



**REPÚBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

**EVALUACION PRELIMINAR DE ALTERNATIVAS DE
MITIGACION DE CONTAMINANTES EN EL RIO LLUTA A
PARTIR DE UNA CARACTERIZACION DE LAS FUENTES DE
CONTAMINACION.**

REALIZADO POR:

DICTUC S.A.

Departamento de Estudios y Planificación

S.I.T. N° 153

SANTIAGO, NOVIEMBRE 2008

**Ministro de Obras Públicas
Sr. Sergio Bitar**

**Director General de Aguas
Sr. Rodrigo Weisner**

**Jefa Departamento de Estudios y Planificación
Ing. Sr. Pedro Rivera I.**

**Inspector Fiscal
Ing. Sr. Luis Rojas B.**

DICTUC S.A.:

**Jefe de Proyecto
Ing. Sr. Pablo Pastén G.**

**Jefe de Proyecto Alterno
Ing. Sr. Gonzalo Pizarro P.**

**Asesor Regional
Lic. Sra. Lorena Cornejo P.**

**Ingeniero de Proyecto
Ing. Srta. Katherine Lizama A.**

1. Tipo Informe Informe técnico folio N° 796792	2. Cuerpo del Informe 203 hojas (incluye portada)
3. Título del Proyecto Evaluación Preliminar de Alternativas de Mitigación de Contaminantes Relevantes en el río Lluta a partir de una Caracterización de las Fuentes de Contaminación	4. Fecha Informe Noviembre 2008
5. Autor (es) Jefe de Proyecto: Pablo Pastén González Jefe de Proyecto Alternativo: Gonzalo Pizarro Puccio Ingeniero de Proyecto: Katherine Lizama Allende	6. Contrato 30069167-0
6. Nombre y Dirección de la Organización Investigadora DICTUC; Pontificia Universidad Católica de Chile Vicuña Mackenna N° 4860, Casilla 306 – Correo 22, Macul - Santiago	7. Período de Investigación Noviembre-Julio 2008
8. Antecedentes de la Institución Mandante Nombre : Dirección General de Aguas- MOPTT Dirección: Morandé 59- 8° piso RUT: 61.202.000-0 Teléfono: 4493804 Fax: 4493825	9. Contraparte Técnica Nombre: Luis Rojas Cargo: Inspector Fiscal
10. Resumen Informe final. Se analiza la información recopilada principalmente en el trabajo en terreno y otras fuentes en la cuenca del río Lluta: factores biogeoquímicos, hidrológicos y humanos que la caracterizan. Se proponen alternativas de mitigación para los contaminantes boro y arsénico según lo presentado.	

Sr. Pablo Pastén González
Jefe de Proyecto

DICTUC S.A.

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción.....	15
2.	Objetivos.....	15
3.	Estrategia para el desarrollo del trabajo y descripción de las actividades realizadas..	16
4.	Antecedentes considerados.....	18
4.1	Datos DGA y otros estudios	18
4.2	Información sobre boro y arsénico	20
5.	Campañas de Terreno	22
5.1	Metodología empleada	22
5.2	Resumen de las Campañas de Muestreo.....	25
5.2.1	Campaña 1	25
5.2.2	Campaña 2	25
5.2.3	Campaña 3	26
5.2.4	Campaña 4	26
5.3	Caudales	27
5.4	Reuniones y actividades relacionadas	29
6.	Análisis de información.....	31
6.1	Geoquímica.....	31
6.1.1	Introducción.....	31
6.1.2	Factores y procesos que controlan la calidad del agua en una cuenca	31
6.2	Preocupaciones de la población.....	82
7.	Tecnologías de control de la calidad del agua. Aspectos generales para establecer una base conceptual común.....	83
7.1	Procesos unitarios de tratamiento de aguas	84
7.1.1	Coagulación/floculación.....	84
7.1.2	Sedimentación	85
7.1.3	Filtración.....	85
7.1.4	Adsorción	86
7.1.5	Precipitación	87
7.1.6	Membranas	87
7.1.7	Desinfección	88
7.2	Tecnologías de tratamiento para boro y arsénico	89
8.	Alternativas para mitigación de boro y arsénico	94
8.1	Situación general y alternativas.....	94
8.2	Selección de fuentes de buena calidad	95
8.3	Mitigación usando fuentes naturales de agua de diferentes calidades.....	102
8.4	Intervención de fuentes de mala calidad.....	103
8.4.1	Descripción de alternativas.....	103
8.4.2	Evaluación termodinámica	105
8.4.3	Evaluación experimental	110

9.	Impacto de un embalse en el río Lluta.....	115
9.1	Lodos arsenicados	116
9.2	Cambios en la calidad del agua a embalsar	118
9.3	Calidad natural del agua	119
10.	Conclusiones.....	123
11.	Bibliografía.....	125
12.	Anexos.....	127
12.1	Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo del estudio. Datum PSAD 1956 / UTM Uso 19 S.	127
12.2	Información de salida de simulaciones en PHREEQC.....	132
12.3	Mediciones de terreno y de laboratorio	188

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Concepto general del estudio y sus resultados. El estudio mejorará el conocimiento del río Lluta y propondrá medidas de control que luego el Gobierno y la comunidad evaluarán en los contextos pertinentes.....	17
Figura 2. Esquema de toma de decisiones para el muestreo.	18
Figura 3. Esquema representativo de la cuenca del río Lluta, principales afluentes y estaciones de monitoreo de la DGA.	19
Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo y medición en la cuenca del Lluta.	24
Figura 5. Procesos y factores que regulan la calidad del agua en una cuenca.....	32
Figura 6. Diagrama pE-pH para el sistema arsénico. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Lluta. Adaptado de Snoeyink y Jenkins (Snoeyink and Jenkins, 1980).....	34
Figura 7. Datos históricos de la DGA para la concentración de arsénico.	35
Figura 8. Mediciones de arsénico total reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.....	37
Figura 9. Datos históricos de la DGA para el pH.	38
Figura 10. Mediciones de pH reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.	39
Figura 11. Diagrama pC-pH para el sistema boro. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Lluta.	40
Figura 12. Datos históricos de la DGA para la concentración de boro.	41
Figura 13. Mediciones de boro reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.....	42
Figura 14. Diagrama pE-pH para el sistema azufre. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Lluta. Adaptado de Snoeyink y Jenkins (Snoeyink and Jenkins, 1980).....	43
Figura 15. Afloramiento hidrotermal ($T=50^{\circ}\text{C}$) que da origen al Azufre.	44
Figura 16. Diagrama pE-pH para el sistema hierro. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Lluta. Adaptado de Snoeyink y Jenkins (Snoeyink and Jenkins, 1980).....	45
Figura 17. Formación de recubrimientos de óxidos de hierro sobre piedras en Caracarani aguas abajo de junta con Azufre.....	45
Figura 18. Acumulación de óxidos de hierro sector azufrera Tacora.	46
Figura 19. Capa de sedimentos en Caracarani aguas abajo de la junta con el Azufre.	46
Figura 20. Capa de sedimentos en Caracarani aguas abajo de la junta con el Azufre.	46
Figura 21. Flóculos de hidróxidos de hierro formados gracias a la adición de base en Caracarani aguas abajo de la junta con el Azufre.....	47
Figura 22. Datos históricos de la DGA para la concentración de hierro.	48
Figura 23. Mediciones de hierro total reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.....	49
Figura 24. Solubilidad del bórax en función del pH.	53
Figura 25. Solubilidad de la colemanita en función del pH.	54
Figura 26. Solubilidad de la hidroboraquita en función del pH.....	54
Figura 27. Solubilidad de la ulexita en función del pH.	55
Figura 28. Solubilidad de la sassolita en función del pH.	55

Figura 29. Formación de minerales en las orillas del río Azufre en el sector bocatoma canal Azufre.	57
Figura 30. Formación de minerales en las orillas del río Azufre en el sector bocatoma canal Azufre.	57
Figura 31. Junta Caracarani con Colpitas, aguas arriba de Lluta en Alcérreca.	58
Figura 32. Junta Caracarani con Colpitas, aguas arriba de Lluta en Alcérreca.	58
Figura 33. Costras salinas en el sector de Caracarani.	59
Figura 34. Costras salinas en el sector de Colpitas y borateras.	59
Figura 35. Diagramas Stiff, Campaña 1, Lluta bajo.	61
Figura 36. Diagramas Stiff, Campaña 3, Lluta bajo.	61
Figura 37. Diagramas Stiff, Campaña 4, Lluta bajo.	62
Figura 38. Diagramas Stiff, Campaña 4, Lluta bajo, continuación.	62
Figura 39. Diagramas de Piper para las principales estaciones de monitoreo del río Lluta, mediciones de este estudio (izquierda) y datos históricos de la DGA (derecha).	63
Figura 40. Datos históricos de la DGA para la concentración de sulfato.	64
Figura 41. Mediciones de sulfato reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.	65
Figura 42. Datos históricos de la DGA para la concentración de cloruro.	66
Figura 43. Mediciones de cloruro reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.	67
Figura 44. Datos históricos de la DGA para la conductividad.	68
Figura 45. Mediciones de conductividad reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.	69
Figura 46. Datos históricos de la DGA para la concentración de sodio.	70
Figura 47. Mediciones de sodio reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.	71
Figura 48. Cultivos en el valle del Lluta, sector Arancha.	72
Figura 49. Cultivos en el valle del Lluta, sector Vinto.	72
Figura 50. Conductividad medida en el río Caracarani-Lluta en función de la distancia de la medición a la Desembocadura del río Lluta, enero y abril 2008. Desde aguas arriba a aguas abajo, los números de las flechas corresponden a los puntos Lluta en Poconchile (1), Lluta en Puente Chacabuco (2), Lluta en Puente Santa Lucía (3) y Lluta en Panamericana (4).	73
Figura 51. Conductividad medida en el río Caracarani-Lluta en función de la distancia de la medición a la Desembocadura del río Lluta, diciembre 2007.	74
Figura 52. Precipitación, caudal y conductividad media diaria, enero y febrero 2002, estación Lluta en Alcérreca.	75
Figura 53. Precipitación y conductividad media diaria, noviembre 2003 a marzo 2004, estación Lluta en Alcérreca.	76
Figura 54. Caudal y conductividad media diaria, noviembre 2003 a marzo 2004, estación Lluta en Alcérreca.	77
Figura 55. Variación horaria de la conductividad, junta Lluta en Alcérreca.	78
Figura 56. Relación entre conductividad y temperatura, junta Lluta en Alcérreca.	79
Figura 57. Sedimentos de Lluta en Alcérreca con alto contenido de oxihidróxidos de fierro.	80
Figura 58. Sedimentos de Lluta en Alcérreca con alto contenido de oxihidróxidos de fierro. Cerca de 28 mg Fe/g sedimento o un 6% del sedimento como Fe(OH) ₃ . Este sedimento tiene del orden de 1,3 mg As/g sedimento, muy probablemente como especie sorbida al fierro.	80

Figura 59. Relación entre arsénico total y fierro total. La correlación aumenta aguas abajo del río Lluta. Datos DGA, estación Lluta en Panamericana.....	81
Figura 60. Relación entre arsénico total y fierro total. La correlación aumenta hacia agua abajo del río Lluta. Datos DGA, estación Lluta en Panamericana.	81
Figura 61. Las partículas se juntan y forman flóculos, que luego sedimentan. Adaptado de Kalenda (Kalenda, 2002).	85
Figura 62. Representación esquemática del proceso de sedimentación. Las partículas se depositan en el fondo por efecto gravitatorio. Adaptado de Casiday et al. (Casiday et al., 2008).....	85
Figura 63. Separación de las partículas de la fase acuosa mediante un filtro. Adaptado de MOE, SG (Ministry of Education Singapore Government, 2007).	86
Figura 64. Esquema de la adsorción: el adsorbido se adhiere a la superficie del adsorbente. El proceso inverso se conoce como desorción. Adaptado de Hennig and Degel (Henning and Degel, 1990).	86
Figura 65. Representación esquemática del intercambio iónico: el sodio reemplaza al protón, mientras el hidroxilo es reemplazado por el cloruro (Aqua Technology Water Stores, 2005).	87
Figura 66. Durante la precipitación química, se forma un sólido en la solución gracias a una reacción química. Este se denomina precipitado, mientras que el líquido remanente sobre el sólido se denomina sobrenadante. Elaboración propia.	87
Figura 67. Proceso de osmosis reversa. Las sales quedan retenidas en la membrana. Adaptado de Vertex (Vertex Hydropore, 2008).	88
Figura 68. Esquema de los principales aportes al río Lluta que tienen agua de buena calidad.....	96
Figura 69. Mediciones de pH reportadas por este estudio, cursos de buena calidad.....	96
Figura 70. Mediciones de conductividad reportadas por este estudio, cursos de buena calidad.....	97
Figura 71. Mediciones de boro reportadas por este estudio, cursos de buena calidad.	98
Figura 72. Mediciones de arsénico reportadas por este estudio, cursos de buena calidad. .	99
Figura 73. Cuencas menores al oriente del río Caracarani, que aportan agua de buena calidad.....	101
Figura 74. Sedimentos recubiertos con óxidos de fierro en la estación Lluta en Tocontasi.	103
Figura 76. Ubicación del yacimiento de caliza Humapalca (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2004).	104
Figura 78. Solubilidad del bórax en función del pH.	106
Figura 79. Solubilidad de la colemanita en función del pH.	106
Figura 80. Solubilidad de la hidroboracita en función del pH.....	107
Figura 77. Dosis de cal y carbonato de calcio requerida para el aumento de pH del agua del río Azufre y agua pura.	107
Figura 81. Índice de saturación de los minerales en función de la dosis agregada de CaCO_3 (g/L).	108
Figura 82. Índice de saturación de los minerales en función de la dosis agregada de Ca(OH)_2 (g/L).	109
Figura 83. Índice de saturación de los minerales en función de la dosis agregada de MgCl_2 más CaCl_2 (g/L), considerando una dosis inicial de 0,06 M CaCO_3	109
Figura 84. Remoción de boro en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y Ca(OH)_2 al Azufre hasta pH 6.	111

Figura 85. Azufre antes de tratamiento con cal -derecha- y Azufre luego de dicho tratamiento -izquierda-	112
Figura 86. Remoción de boro en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y NaOH al Azufre hasta pH 7.	112
Figura 87. Remoción de arsénico en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y NaOH al Azufre hasta pH 7.....	113
Figura 88. Remoción de fierro en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y NaOH al Azufre hasta pH 7.....	114
Figura 89. Acumulación de arsénico en los sedimentos depositados en el embalse al cabo de 5 años, considerando distintas concentraciones de As total en el río Lluta.....	116
Figura 90. Acumulación de arsénico en los sedimentos depositados en el embalse, en función de la concentración de As total en el río Lluta, considerando un horizonte de 5 años.....	117
Figura 91. Variación temporal de la conductividad media diaria, estación Lluta en Alcérreca.....	120
Figura 92. Variación temporal del caudal medio diario, estación Lluta en Alcérreca.	121
Figura 93. Frecuencia acumulada para el valor de la conductividad, estación Lluta en Alcérreca.....	121
Figura 94. Caudal medio diario que posee una conductividad igual o menor, estación Lluta en Alcérreca.	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tolerancia relativa de cultivos agrícolas al boro.....	20
Tabla 2. Caudales reportados para los puntos de muestreo.....	28
Tabla 3. Minerales de boro potencialmente relevantes (elaboración propia a partir de Anovitz y Grew (2002), y de Bladh et. al (2001) (Bladh et al., 2001)). Se presentan primero aquellos para los que se conocen datos termodinámicos.....	51
Tabla 4. Reacciones de disolución y constantes termodinámicas usadas en los cálculos de solubilidad. Aunque esta tabla omite reacciones de complexación para especies acuosas derivadas de la solubilización, éstas se consideraron en los cálculos.....	53
Tabla 5. Resumen de las preocupaciones de la comunidad del Valle del Lluta.....	82
Tabla 6. Remoción de contaminantes por tipo de tratamiento.....	88
Tabla 7. Tratamientos factibles para la remoción de B y As.....	89
Tabla 8. Eficiencias típicas y pérdidas de agua para tratamientos de As.....	89
Tabla 9. Comparación de los sistemas de remoción de arsénico.....	90
Tabla 10. Comparación de los sistemas de remoción de boro.....	92
Tabla 11. Principales datos de calidad del agua de quebradas menores.....	100
Tabla 12. Caudales medidos en terreno y estimados a partir de información del Balance Hídrico de Chile.....	101
Tabla 13. Valores estimados resultantes para la mezcla del agua del Caracarani con quebradas menores.....	102

Agradecimientos

Agradecemos a todos quienes colaboraron en la ejecución de este proyecto, en particular en el trabajo en terreno: la Junta de Vigilancia del río Lluta, DGA de la Región de Arica y Parinacota, la SEREMI de Agricultura Sra. Pilar Mazuela.

Presentación

Los recursos hídricos en la zona norte de nuestro país limitan el desarrollo socio-económico. En períodos secos o de bajas precipitaciones se observa una escasez general de agua y un descenso sostenidos de niveles en acuíferos, sumado al consecuente empeoramiento de la calidad del recurso hídrico. En condición húmeda, en cambio, se anteponen los daños directos e indirectos a la propiedad pública y privada producto de las crecidas.

Es por esto que resulta fundamental para el desarrollo regional analizar los desafíos y oportunidades en cuanto a los recursos hídricos, en orden a asegurar a mediano y largo plazo un desarrollo socioeconómico sustentable para la naciente Región de Arica y Parinacota. Reconociendo además el déficit hídrico estructural que presenta la cuenca del San José y la mala calidad hidroquímica del Lluta; los efectos negativos de las crecidas estivales en Arica; y la presencia de actividades productivas importantes en San José y Lluta que se ven afectadas por la escasez del recurso hídrico, se desarrolló un Plan Hidrológico Integral para la cuenca del San José y una aproximación inicial a la del río Lluta, de acuerdo a la problemática regional y los objetivos estratégicos territoriales detectados y discutido en una Mesa Publica Privada de Arica Parinacota. Del trabajo de esta mesa, se obtuvo como un elemento de diagnóstico caracterizar las fuentes del boro y arsénico en el río Lluta y evaluar si es viable implementar medidas de mitigación para disponer de aguas de buena calidad para la agricultura y uso en agua potable. El desarrollo de este estudio contribuye con información relevante a la caracterización de las fuentes de contaminación de estos elementos, lo cual sienta las bases para la evaluación de medidas de mitigación costo-efectivas que permitan contar con recursos hídricos de mejor calidad.

Resumen

El río Lluta y sus afluentes principales cuentan con altas concentraciones de boro y arsénico, junto con otros problemas de calidad como la acidez y la salinidad. Esto se debe a la geología de la cuenca, en especial al Volcán Tacora que aporta metales, sales y acidez al río Azufre; y a los afloramientos hidrotermales -denominados “borateras”- ubicados en la Quebrada de Colpitas y que aportan mayormente boro, arsénico y iones al río del mismo nombre.

Se caracterizó espacial y temporalmente la presencia de los principales contaminantes de la cuenca, gracias a las mediciones en terreno y en laboratorio. Además, hacia la parte baja de la cuenca, aumenta el pH, la conductividad y la concentración de boro. Esto se atribuye a una concentración del río debido a la evaporación causada por las altas temperaturas de la zona, a lo que se agrega la evapotranspiración de los cultivos.

Las precipitaciones causadas por el invierno altiplánico presentan un aleatorio y acotado efecto de dilución de las aguas del río Lluta. Aunque se ha observado que el contenido de sales disminuye gracias a las lluvias, una vez finalizados dichos eventos la calidad del río vuelve a ser similar a la que tenía originalmente. Además, se pudo observar durante la temporada de invierno altiplánico del año 2008 que las concentraciones de boro siguen siendo altas incluso después de una semana de precipitaciones, por lo que esto no contribuye a mejorar la calidad del río Lluta. Además, sedimentos y otros sólidos pueden desembocar en el río, arrastrados por las lluvias.

La caracterización de diversas fuentes de agua en distintas zonas de la cuenca y no sólo de los ríos permitió identificar quebradas de calidad superior a los cursos principales: menor conductividad, y bajas concentraciones de boro y arsénico. Estas quebradas desembocan al río Caracarani desde el oriente, después de la junta con el río Azufre, con un caudal total del orden de 350 L/s. La Quebrada Allane y otras quebradas menores ubicadas en la Quebrada Colpitas presentan similares características, junta con la Quebrada Aroma.

En perspectiva de la caracterización de calidad del agua de la cuenca del río Lluta, la alternativa de gestión que parece más conveniente es aprovechar los pocos recursos de buena calidad que existen en la zona alta de la cuenca, como los recién mencionados. Obras que interceptaran estos recursos antes de descargar al río Caracarani parecen una alternativa conveniente. En este mismo sentido, también se puede pensar en recuperar aguas de la zona más alta de la cuenca, sobre Humapalca y conducir las en forma independiente, es decir considerar estas quebradas al oriente de Caracarani junto con dicho río (antes de la junta con el Azufre), puesto que así se contaría con 600 L/s aproximadamente de agua de calidad apta para riego.

Se requiere conocer más profundamente el funcionamiento hidrológico de las quebradas menores para poder evaluar la cantidad de agua efectivamente disponible, junto con la variabilidad estacional de la calidad del agua de las mismas. Además, es de vital importancia evaluar el posible impacto que estas acciones tendrían sobre los poblados que actualmente utilizan el agua de estas quebradas, como Ancolacane, Chuquiananta, Quecalani y Cascavillani. Preliminarmente, si se recupera aguas abajo de dichos poblados, el impacto sería nulo.

Además de considerar el uso de fuentes de calidad superior a la del río Lluta, se analizó la alternativa de implementar sistemas de mitigación de contaminantes en la fuente. Este estudio considera que las principales fuentes de contaminación naturales son el río Azufre y el río Colpitas. La calidad de estos cauces indica que sería factible mezclar sus aguas de manera de favorecer reacciones químicas, favoreciendo la precipitación tanto de hidróxidos de fierro -que son capaces de sorber arsénico- como de minerales boratados. Si se dejan sedimentar estas partículas, los contaminantes pueden ser removidos. Esto se probó preliminarmente en ensayos de laboratorio. Si se estudia posteriormente esta alternativa, se requiere tomar en cuenta la gestión de los lodos que se producirían. Además, otros contaminantes que están en el agua no serían removidos por este sistema, por lo que la salinidad no disminuiría.

Con respecto al rol del Volcán Tacora en la calidad del agua de la cuenca, se requiere explorar más detalladamente si se produce un drenaje ácido o son afloramientos hidrotermales. Para esto, se necesitaría inspección y muestreo del lugar de explotación de la planta minera de extracción de azufre que existió unos años atrás en el Volcán Tacora.

1. Introducción

La Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas -en adelante, DGA- encargó a la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas -DICTUC S.A.- la ejecución del estudio “Evaluación preliminar de alternativas de mitigación de contaminantes relevantes en el Río Lluta a partir de una caracterización de las fuentes de contaminación” (Código BIP 30069167-0).

Este documento presenta el informe final del proyecto, y describe los siguientes puntos:

- Estrategia para el desarrollo del trabajo y descripción de actividades
- Antecedentes considerados
- Campañas de terreno
- Análisis de información: biogeoquímica de la cuenca
- Tecnologías de control de la calidad del agua
- Alternativas de mitigación para boro y arsénico
- Impactos de un embalse en el río Lluta

El comportamiento de la cuenca es el resultado de la interacción compleja de distintos procesos físicos, químicos, y biológicos, algunos de ellos de naturaleza estocástica. En consecuencia, es difícil realizar predicciones con 100% de certeza de los efectos que las acciones humanas o eventos naturales. Cualquier decisión que se implemente en el marco de la gestión del recurso hídrico deberá ser objeto de evaluación y mejoramiento permanente.

Cada curso de acción tiene ventajas y desventajas, de modo que más que privilegiar una alternativa por sobre otra, el enfoque de este estudio es presentar información sobre las ventajas y desventajas de distintas alternativas para que los actores involucrados tomen las decisiones pertinentes. Entre las actividades realizadas en este estudio se consideró la participación de la comunidad a través de presentaciones realizadas en Poconchile y en Arica, además de la presentación de los resultados finales del estudio frente a las autoridades regionales y representantes de organizaciones regionales.

2. Objetivos

Los objetivos de este estudio son:

- Caracterizar espacial y temporalmente la concentración de boro y arsénico, a lo largo del cauce del río Lluta y de sus principales afluentes.
- Realizar una proposición preliminar de alternativas de mitigación para contar con aguas de mejor calidad.

3. Estrategia para el desarrollo del trabajo y descripción de las actividades realizadas

El objetivo principal de este trabajo es ayudar a identificar medidas de mitigación que permitan disponer de recursos hídricos de mejor calidad en el valle del río Lluta para la actividad agrícola y uso doméstico, basándose en la caracterización espacial y temporal de los contaminantes de interés: boro y arsénico. Los antecedentes aportados por el presente estudio servirán para apoyar la toma de decisiones tendientes a estimular la actividad socioeconómica en la Región de Arica y Parinacota, tal como se indica en la Figura 1.

El trabajo se ha desarrollado siguiendo lo indicado en los términos de referencia del estudio, en la propuesta técnica ofertada, y lo acordado en las reuniones con la Inspección Técnica. Dada la naturaleza del trabajo, se ha mantenido como criterio fundamental la compatibilización de los objetivos del estudio, la adaptación a las condiciones encontradas en terreno, la flexibilidad frente al hallazgo de aspectos de interés técnico, los plazos y presupuesto disponible, y la seguridad del personal involucrado.

La estrategia de trabajo ha contemplado los siguientes principios:

- Maximizar el aprovechamiento de la información existente sobre calidad del agua. Se ha buscado y solicitado distintas fuentes de información tanto nacional como internacional, ya sea asociadas a información específica del río Lluta o al comportamiento y mitigación de los contaminantes de interés.
- Involucrar a la comunidad en el desarrollo del trabajo. Se hizo una presentación a la comunidad de los objetivos y metodología a emplear al comienzo de la consultoría, en particular con los regantes del Río Lluta, y se les integró a través de una ficha de participación. Asimismo se sostuvo una reunión con los directivos de la Junta de Vigilancia donde se hizo una discusión más detallada y se identificó aspectos de interés.
- Participación activa del Staff Superior en la realización del trabajo en terreno. El Jefe de Proyecto y el Jefe de Proyecto Alternativo integraron el equipo de muestreo durante todas las campañas de muestreo. Esto ha permitido aumentar sustancialmente la fuerza de trabajo, la efectividad en terreno, acelerar la toma de decisiones frente a condiciones encontradas, y un conocimiento más acabado de los factores hidrológicos, biogeoquímicos, y humanos que caracterizan la cuenca del Lluta.
- Uso de metodologías probadas y adecuadas a las condiciones de terreno. Junto con trabajar con las metodologías requeridas en las bases técnicas y equipos de medición avanzados, el mismo personal profesional que analiza la información ha participado activamente en el muestreo en terreno.

La Figura 2 muestra cómo se integran estos principios en la estrategia de trabajo.

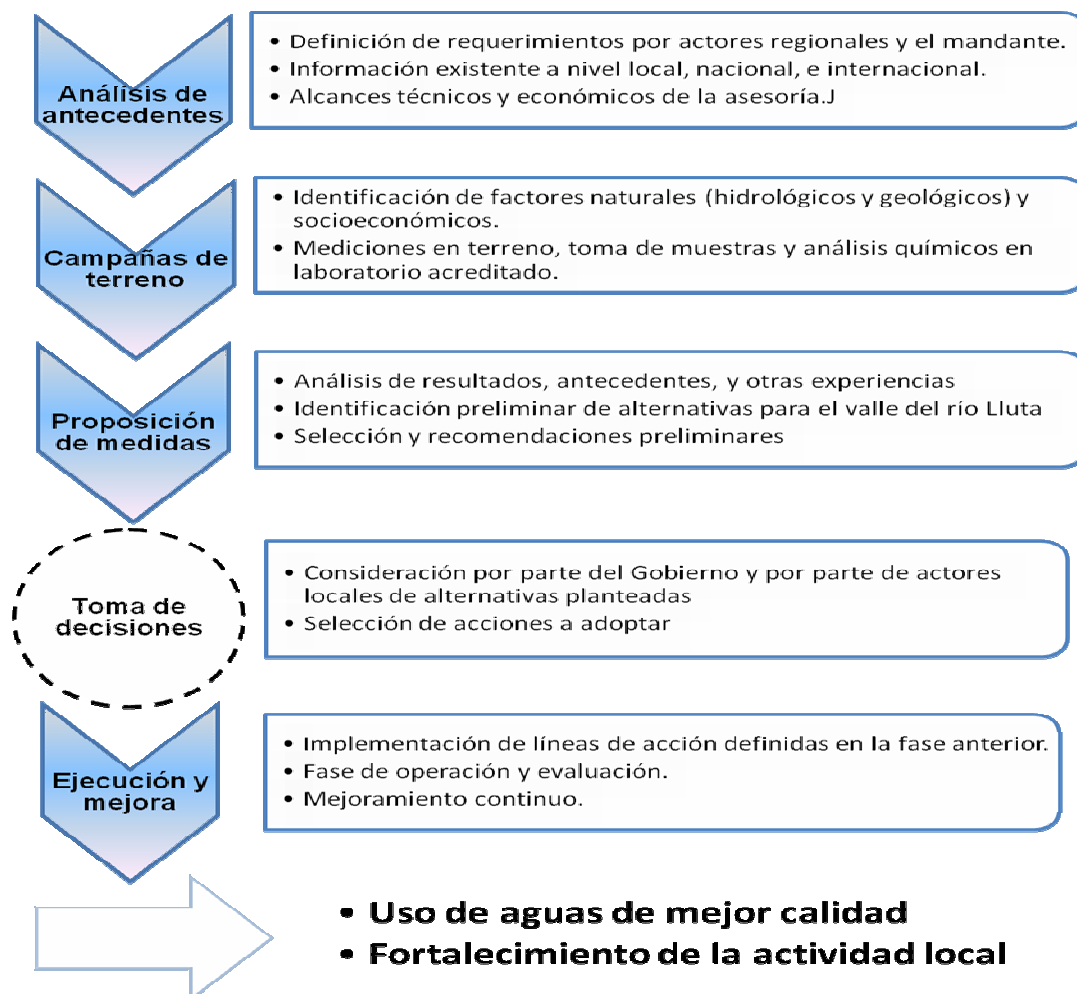


Figura 1. Concepto general del estudio y sus resultados. El estudio mejorará el conocimiento del río Lluta y propondrá medidas de control que luego el Gobierno y la comunidad evaluarán en los contextos pertinentes.

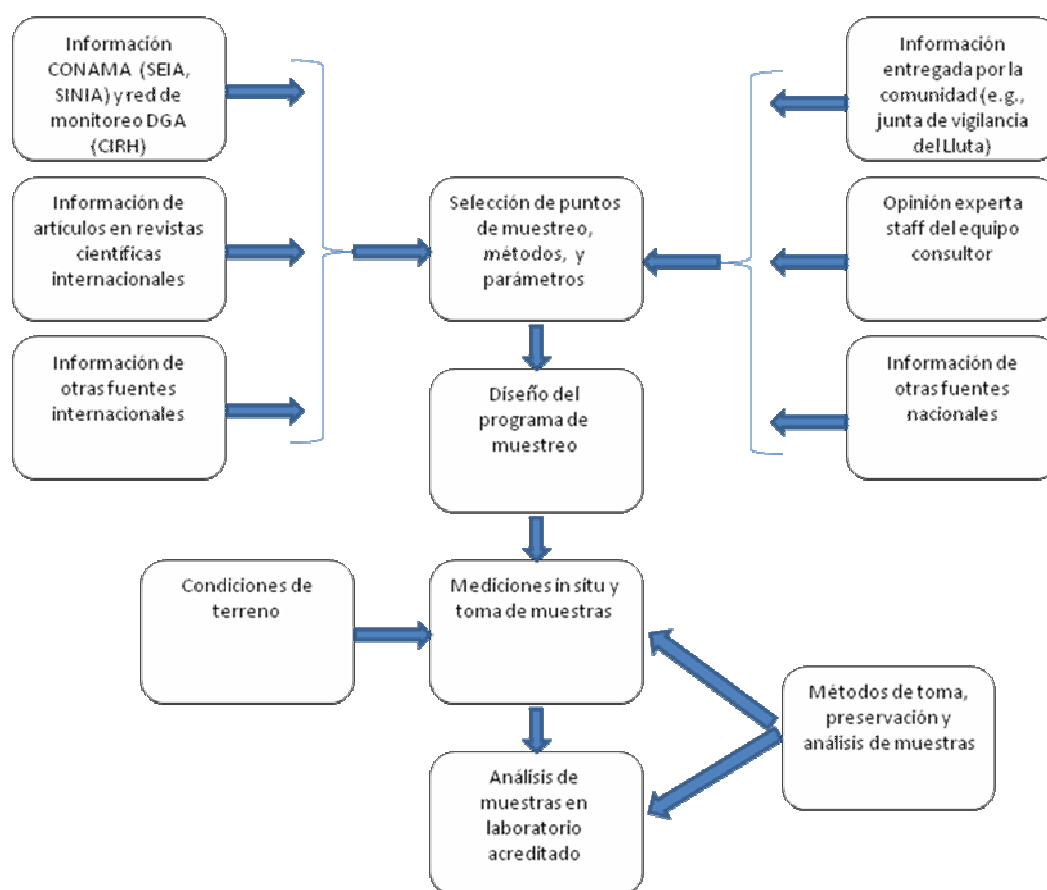


Figura 2. Esquema de toma de decisiones para el muestreo.

4. Antecedentes considerados

4.1 Datos DGA y otros estudios

La información disponible de la cuenca proviene de tres fuentes principales: La Dirección General de Aguas, el estudio de CADE-IDEPE (Dirección General de Aguas, 2004) y el estudio de la JICA (Japan International Cooperation Agency, 2005). El estudio de CADE-IDEPE se basó en la información entregada por la DGA y en un muestreo puntual en octubre 2003, mientras que en el estudio de la JICA se realizó un muestreo puntual en junio 1993.

La DGA proporcionó información de parámetros fisicoquímicos de las estaciones de calidad del agua de la zona de estudio: Caracarani en Alcérreca -antes de la junta con Colpitas-, Colpitas en Alcérreca -antes de la junta con Caracarani-, Lluta en Tocontasi y Lluta en Panamericana. La información está disponible desde el año 1980 hasta el 2007 aproximadamente, y la periodicidad de los muestreos varía entre 1 y 4 veces al año. Los parámetros medidos son: temperatura, pH, conductividad, oxígeno disuelto, carbonato, bicarbonato, cloruro, sulfato, calcio, magnesio, potasio, sodio, plata, aluminio, arsénico, boro, cadmio, cobalto, cromo, cobre, fierro, mercurio, manganeso, molibdeno, níquel, plomo, selenio, zinc, nitrato, fosfato y DQO. La estación Lluta en Alcérreca cuenta con

una sonda multiparamétrica que mide principalmente temperatura, pH y conductividad; y no se realizan análisis químicos de laboratorio. La estación Caracarani en Humapalca es solamente fluviométrica.

Con esta información fue posible observar para qué puntos y en qué tramos del río y sus afluentes se puede contar con información periódica de los distintos parámetros, en qué rango se encuentran dichas mediciones y principalmente identificar los principales afluentes que son fuentes de contaminantes. Además, se pudo estudiar la factibilidad de agregar otros puntos de muestreo que no habían sido considerados por estos estudios y que pudiesen entregar información relevante de la calidad del agua de la cuenca. Estos puntos de muestreo tienen especial relevancia en cuanto a las alternativas de mitigación revisadas en el estudio, y los principales resultados se presentan en el punto 7.2.

La Figura 3 es una representación esquemática de los principales hitos de la cuenca y los principales afluentes del río Lluta, indicándose la ubicación de las estaciones de monitoreo de la DGA recién mencionadas. Los principales resultados para los parámetros de interés se resumen en el punto 5, en el contexto de la geoquímica de la cuenca.

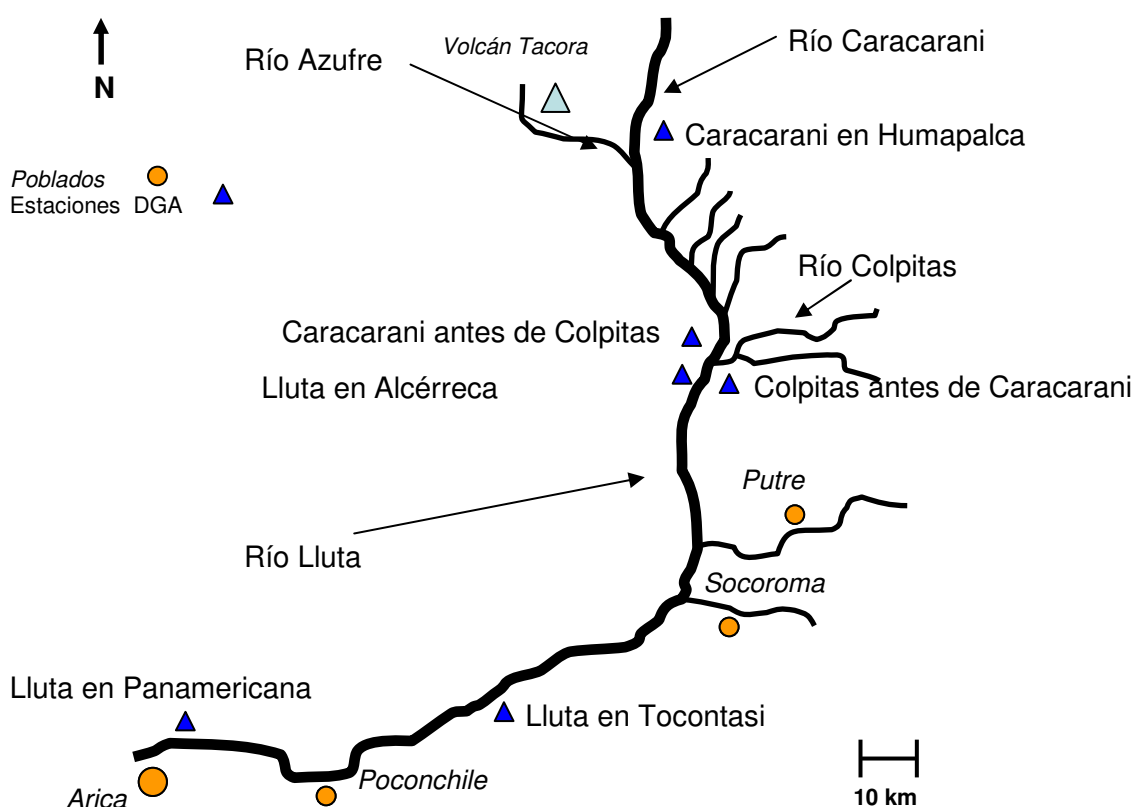


Figura 3. Esquema representativo de la cuenca del río Lluta, principales afluentes y estaciones de monitoreo de la DGA.

4.2 Información sobre boro y arsénico

Esta sección presenta un resumen de antecedentes sobre efectos del boro y el arsénico sobre plantas y la salud humana, así como valores de referencia y estándares de calidad asociados.

El boro es un micronutriente esencial para el crecimiento de los organismos. Sin embargo, puede tener efectos adversos en animales y humanos si se encuentra en altas concentraciones en aguas para bebida y/o riego. Este es un problema que puede afectar en particular el crecimiento de plantas localizadas en zonas áridas o semiáridas (Nable et al., 1997) como es el valle del Lluta.

Las concentraciones de boro toleradas por distintos cultivos se presentan en la Tabla 1, de acuerdo a Xu y Jiang (Xu and Jiang, 2008). Al respecto, es importante considerar que las plantas presentan variabilidad en su respuesta frente al boro. Investigaciones genéticas y fisiológicas recientes han permitido entender algo de la variabilidad genética de la respuesta de las plantas frente al boro. De acuerdo a Nable et al. (1997), un set de varios genes aditivos controla los mecanismos de resistencia contra el boro, habiéndose identificado la posición de los genes en el cromosoma para algunos casos. Varias especies comparten un mecanismo similar de tolerancia: reducir la incorporación de boro a través de los tallos y raíces. Aunque estas investigaciones no explican completamente la variabilidad de las respuestas observadas frente a altas concentraciones de boro, han permitido disponer de genotipos tolerantes a altas concentraciones de boro (Nable et al., 1997).

Tabla 1. Tolerancia relativa de cultivos agrícolas al boro.

Concentración máxima en agua de riego (mg/L)	Cultivo
0,5-1	Cebolla, ajo, trigo, cebada, girasol, durazno, ciruela, cereza, uva, frutilla
1-2	Zanahoria, rábano, papa, pepino, pimiento rojo
2-4	Lechuga, maíz, apio, maíz, avena
4-6	Tomate, perejil, alfalfa, remolacha, betarraga
6-15	Esparrágos

Fuente: Adaptado de Xu and Jiang (2008).

Además de la variabilidad de respuesta en las plantas, otro factor que modula el efecto del boro en los cultivos es el manejo agronómico y las prácticas de irrigación. Aunque estos temas no competen a este estudio, se estima que la región debe dedicar esfuerzos y recursos a identificar prácticas agronómicas, sistemas de irrigación, y especies resistentes cuya comercialización sea atractiva.

La exposición al boro también se ha asociado a riesgos para la salud humana. En la guía informativa sobre el boro de la EPA (U.S. Environmental Protection Agency, 2008) se discute los riesgos asociados al boro y se recomienda un valor máximo para agua potable de 0,5 mg/L. El boro es absorbido fácilmente desde el tracto gastrointestinal,

distribuyéndose uniformemente sobre los tejidos blandos, aunque también se ha observado algo de acumulación en los huesos. Los estudios toxicológicos apuntan a que el mayor efecto crónico del boro se produce sobre el sistema reproductivo masculino, afectando la generación de semen en los testículos, mientras que no se dispone de evidencia de genotoxicidad o de carcinogenicidad. Cabe destacar que el valor de 0,5 mg/L es una recomendación de la EPA y no un valor regulatorio.

En Chile el boro no está normado para el agua potable (NCh 409), mientras que en el agua para riego debe ser menor a 0,75 mg/L (NCh 1333). La concentración guía provisional de la OMS para consumo humano es de 0,5 mg/L (World Health Organization, 2003), valor considerado provisional por la dificultad de alcanzar ese valor en fuentes de agua con altas concentraciones naturales de boro, como es el caso del río Lluta.

A diferencia del boro, los efectos tóxicos del arsénico sobre la salud humana son diversos y han sido ampliamente documentados. Su toxicología depende fuertemente de su especiación química, siendo más tóxicas las especies de As(III) que las de As(V) y las especies inorgánicas (arsenito, arsenato) que las especies orgánicas (e.g., ácidos monometil y dimetil arsénico). Los organismos acuáticos y terrestres tienen un rango amplio de sensibilidades respecto a las diferentes especies de arsénico y el modo de ingreso al organismo difiere ampliamente. Por ejemplo, el arsénico se encuentra menos bioaccesible para las plantas en ambientes donde existen óxidos de hierro, pues permanecen asociados a la fase sólida fuera de las plantas. Uno de los mecanismos comunes de acción del arsénico es la unión del arsénico a los grupos sulfhidrilos que se encuentran en las proteínas, impidiendo su accionar normal. El arsénico afecta también los procesos óxido reductivos de las células compitiendo con el fosfato en la fosforilación oxidativa. La exposición a arsénico en agua potable en el largo plazo causa cáncer a la piel, pulmones, vejiga, y riñones, además de endurecimiento y cambios en el color de la piel (hiperqueratosis). Incluso para concentraciones menores a 0,05 mg/L se ha observado mayores riesgos de cáncer a la vejiga y pulmón, y de lesiones en la piel (World Health Organization, 2001). La OMS redujo recientemente su recomendación para la concentración máxima de arsénico en agua potable desde 50 ppb a 10 ppb, guía que ha sido seguida por distintos países, incluido Chile. El nivel de 10 ppb se ha fijado sobre la base de consideraciones analíticas más que porque para esa concentración no se observan efectos negativos. Sería difícil implementar una norma con valores menores a 10 ppb porque actualmente no está ampliamente disponible una técnica que permita medirlo adecuadamente hasta esos niveles.

La normativa chilena para agua potable disminuyó la concentración máxima permitida de 0,05 a 0,01 mg/L, la cual tiene como plazo máximo de cumplimiento 10 años. El plazo del cumplimiento para alcanzar los 0,03 mg/L no puede superar los 5 años. El agua de riego debe cumplir con un máximo de 0,1 mg/L. La concentración máxima recomendada por la OMS para consumo humano es de 0,01 mg/L.

5. Campañas de Terreno

5.1 Metodología empleada

Se realizaron 4 campañas a terreno durante el período diciembre-abril, en las cuales se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- ***Registro e identificación de puntos de muestreo y medición***

Se georreferenciaron los puntos y los caminos para acceder a ellos. Cada campaña cuenta con la siguiente numeración de puntos:

Campaña 1: Puntos 9 a 141

Campaña 2: Puntos 142 a 265

Campaña 3: Puntos 280 a 313

Campaña 4: Puntos 323 a 456

Cada vez que se muestreó un punto se marcó con el GPS -aunque el mismo lugar se haya visitado anteriormente- con el fin de distinguir entre las distintas fechas de muestreo. No necesariamente todos los puntos georeferenciados corresponden a puntos de muestreo. El detalle se incluye en la sección Anexos para cada una de las campañas de terreno.

- ***Mediciones de parámetros in-situ***

Se midió lo siguientes parámetros in-situ: pH, conductividad, temperatura, oxígeno disuelto, turbiedad y potencial redox. Para algunos puntos secundarios sólo se midió pH, temperatura, y oxígeno disuelto.

- ***Muestreo y análisis de laboratorio***

Para el análisis de las muestras se empleó metodologías normalizadas y laboratorios acreditados de acuerdo a ISO17025 y en su defecto lo indicado en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (American Public Health Association, 2005). El muestreo, la preservación, y el transporte de muestras se realizó considerando las normas que el INN dispone para tal efecto, o en su defecto las del US Geological Survey (U.S. Geological Survey, variously dated). Se preservaron en terreno para aquellos parámetros que así lo requerían. Se hicieron los análisis de laboratorio para los parámetros propuestos preliminarmente: cloruro, fluoruro, sulfato, boro, cobre, cromo, fierro, manganeso, zinc, aluminio, arsénico, cadmio, estaño y nitrato. Se agregaron otros que se consideraron relevantes para complementar la información de la química de la cuenca, por ejemplo la DQO y otros iones como calcio, magnesio, sodio, potasio.

- ***Aforo/estimación de caudal***

Se realizaron aforos con la metodología de la DGA para los cauces relevantes, por ejemplo los ríos Lluta, Caracarani y Azufre. Para la medición de velocidad se usó un velocímetro

de efecto Doppler. Para escurrimientos menores se usó el método área velocidad, estimando la velocidad con el método de flotadores para alturas menores a 10 cm.

- ***Búsqueda de nuevos puntos relevantes***

Antes, durante y después de las campañas, se observó tanto en terreno como en imágenes satelitales distintas zonas de interés que podrían aportar información relevante para la caracterización de la cuenca. Entre ellas se puede mencionar:

- Obras o intervenciones humanas
- Quebradas menores que desembocan en el río Lluta o sus afluentes
- Zonas con abundante vegetación, o bien que se distinguieran por alguna otra característica particular (e.g., costras salinas)
- Caminos para acceder a los puntos de interés

De esta manera, además de cubrir los puntos propuestos preliminares, fue posible abarcar distintas zonas de interés para los objetivos del estudio, como se detalla a continuación:

Lluta alto:

En esta zona, se cubrió además del Lluta, los principales afluentes de las Quebradas: Colpitas, Allane, aguas arriba de las quebradas al oriente, y el nacimiento de los ríos Caracarani y Azufre.

Lluta medio:

En la zona del Lluta medio, no fue posible acceder por razones de seguridad a los puntos propuestos en la Quebrada Aroma y Quebrada Jurase. Sin embargo, se tiene información entre Lluta en Tocontasi y Chironta. Además, se cubrió adicionalmente la zona de las quebradas pequeñas cercana a Putre, y que finalmente desembocan en el Lluta.

Lluta bajo:

Para la zona baja, también se agregaron puntos adicionales, principalmente cuando el Lluta cruza el camino que une Arica y Putre: los puentes Chacabuco y Santa Lucía, y la desembocadura.

La Figura 4 muestra los puntos de muestreo y medición en la cuenca del Lluta.

Figura 4. Ubicación de los puntos de muestreo y medición en la cuenca del Lluta.

5.2 Resumen de las Campañas de Muestreo

Esta sección presenta las zonas de muestreo visitadas en cada campaña. Los principales resultados de las mediciones in situ y los análisis de laboratorio se presentan en el punto 5, en el contexto de la geoquímica de la cuenca. El detalle de las mediciones tanto de terreno como de laboratorio se presenta en la sección Anexos.

5.2.1 Campaña 1

La campaña 1 se realizó a principios de diciembre de 2007 con el fin de obtener información de cantidad y calidad del agua antes del período de crecidas. El objetivo principal fue abarcar la mayor parte de los puntos de muestreo sugeridos preliminarmente, para así identificar las rutas de acceso, la ubicación geográfica con GPS y tomar fotografías; con el fin de tener el máximo de información para las campañas siguientes. Por esto, se tomaron muestras y se realizaron mediciones in situ en aquellos lugares que fue más simple acceder, de manera de priorizar el tiempo para poder llegar a los sitios más apartados. Se pudo cubrir prácticamente toda la cuenca, llegando a los siguientes lugares:

Lluta alto:

- Nacimiento Caracarani
- Río Aguas Calientes – Azufre
- Caracarani en junta con Azufre
- Quebradas menores al oriente del Río Lluta y aguas arriba de junta con Colpitas
- Colpitas
- Alcérreca

Lluta medio:

- Quebradas y canales en Putre
- Quebrada Putre 6 Km aguas debajo de Putre
- Quebrada Aroma

Lluta bajo

- Poconchile
- Molinos
- Tocontasi
- Panamericana

El punto de monitoreo de la quebrada de Putre fue de muy difícil acceso. Se realizaron excursiones para acceder a Lluta en junta con quebrada Aroma y Jurase, pero las condiciones del terreno se consideraron peligrosas, de modo que se tomó muestras en las quebradas aguas arriba de la junta.

5.2.2 Campaña 2

Se realizó a mediados de diciembre 2007 con el fin de complementar la Campaña 1 y poder utilizar la información entregada por la comunidad, antes que comenzara la temporada de lluvias. Gracias a esto, se logró acceder a otros lugares que no fue posible acceder en la Campaña 1, por ejemplo al sector de Chironta y el sector de las borateras, aguas arriba de Colpitas. Durante la Campaña 2 se accedió a la parte alta de la cuenca usando el camino que va por el lado norte del río, siguiendo el trazado del oleoducto Sica-Sica. Esto permitió identificar y muestrear puntos relevantes de muestreo como el de la quebrada Huaylas y su junta con el Lluta, que constituye el primer punto aguas arriba de Lluta en Chironta muestreado.

5.2.3 Campaña 3

Se realizó a fines de enero 2008 y tuvo como objetivo poder caracterizar la cuenca durante el invierno altiplánico. Aunque durante la campaña no se produjeron precipitaciones intensas en los lugares de muestreo, se pudo recopilar más información de la hidroquímica de la cuenca, repitiendo el muestreo en puntos relevantes ya visitados anteriormente -por ejemplo los puntos de control- con el fin de comparar con lo observado en las campañas anteriores. Sin embargo, la Campaña 3 ocurrió días después de una tormenta altiplánica importante, de modo que se estima que las condiciones reflejan la respuesta de la cuenca durante el Invierno Boliviano.

Para poder evaluar cómo varían las concentraciones de boro y arsénico aguas abajo de los principales aportes, se consideraron puntos de muestreo entre Poconchile y la desembocadura, incluyendo los puentes Chacabuco y Santa Lucía.

5.2.4 Campaña 4

Se realizó a principios de abril 2008. Tuvo como objetivo aportar más información con respecto a la variabilidad temporal de la calidad del agua de la cuenca. Se volvió a visitar puntos conocidos, y se logró llegar a otras quebradas menores. Por ejemplo, en la zona de la Quebrada de Allane, las que desembocan finalmente a la Quebrada Colpitas. También se logró llegar a la quebradas al oriente de Ancolacane, caminando por la ribera del río Caracarani desde el vadeo más cercano que se encuentra a 1 km.

Se visitó nuevamente la zona de las borateras en la Quebrada Colpitas, donde se han reportado concentraciones de boro en torno a los 350 mg/L, que finalmente aportan al río Colpitas y por tanto al río Lluta.

Cabe destacar además que aguas arriba de la estación Lluta en Panamericana se muestreó la descarga del ril de la desalinizadora Desalari al río Lluta, que presenta entre 30 y 58 mg/L de boro, entre 0,8 y 0,15 mg/L de arsénico, y altas concentraciones de cloruro, sulfato y sodio que hacen que la conductividad bordee los 14 mS/cm. De acuerdo a los antecedentes que se manejan al momento de este informe, la descarga directa al Lluta desde Desalari no cuenta con autorización. Según el EIA del proyecto “Ampliación de la Capacidad de Producción de Agua Potable en Arica; Captaciones Costeras Sondajes Lluta Bajo y Planta Desalinizadora” de la Empresa de Servicios Sanitarios de Tarapacá S.A., ESSAT S.A, la descarga de aguas residuales de la planta desalinizadora se realizará directamente al mar (en la zona de la desembocadura del Lluta). Sin embargo, el equipo

consultor presencié esta descarga adicional al río a principios de febrero de 2008 y a mediados de abril del 2008. Se hizo la consulta respectiva a las autoridades pertinentes, puesto que según el catastro de riles de la SISS no existen industrias que descarguen sus residuos industriales líquidos al río Lluta.

5.3 Caudales

La Tabla 2 muestra los caudales medidos por el equipo profesional, en los puntos más relevantes muestreados en las campañas a terreno.

Cabe destacar que estas mediciones fueron puntuales y que se realizaron utilizando la metodología de la DGA. Asimismo, para efectos de la interpretación de estas mediciones es importante considerar que los aforos realizados corresponden a flujos de agua superficial, pudiendo existir de acuerdo a las condiciones geomorfológicas flujos subterráneos importantes.

Tabla 2. Caudales reportados para los puntos de muestreo.

GPS	Nombre	Q (L/s)
335	APR Putre-Vertiente	12,0
68	Azufre aguas abajo azufrera y antes bocatoma canal	87,4
74	Azufre aguas abajo terma azufrera	12,6
281	Azufre aguas antes terma azufrera	166,7
260	Azufre antes de Caracarani	20,0
414	Azufre antes de Caracarani	50,0
412	Azufre antes de Caracarani	40,0
62	Azufre en cruce camino abajo azufrera	79,3
410	Azufre en Iron Seep-Azufrera	30,0
408	Azufre en nacimiento antes azufrera	5,0
255	Azufre-Canal	60,0
256	Azufre-Canal	46,0
257	Azufre-Canal	27,0
343	Boratera	1,0
345	Boratera	0,5
11	Caracarani antes de Colpitas	1334,3
282	Caracarani después de Azufre	470,4
75	Caracarani después de Azufre	324,5
16	Caracarani desp de quebrada por Hospicio-Cruce	594,8
287	Caracarani desp de quebrada por Hospicio-Cruce	689,7
442	Caracarani desp de Sica y antes q Cascavillani	500,0
71	Caracarani en Humapalca	224,4
280	Caracarani en Humapalca	342,1
9	Colpitas antes de Caracarani	532,3
373	Colpitas antes de Caracarani	525,0
184	Lluta antes Huayla	1200,0
186	Lluta después Huayla	1200,0
10	Lluta en Alcérreca	2035,2
302	Lluta en Panamericana	1254,0
142	Lluta en Poconchile	1200,0
301	Lluta en Poconchile	2254,1
134	Lluta en Tocontasi	1145,0
300	Lluta en Tocontasi	2860,0
298	Lluta Vadeo Arancha	2290,6
357	Quebrada a Caracarani por Hospicio-j Caracarani	5,0
239	Quebrada a Caracarani en Ancolacani	3,0
240	Quebrada a Caracarani en Ancolacani	8,0
288	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-bajo	92,6
241	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-arriba	5,0
243	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-arriba	5,0
248	Quebrada a Caracarani lado oriente por Cascavillani	28,0
289	Quebrada a Carac oriente por Quecalani-Pahuta	198,2
404	Quebrada a Caracarani oriente arriba Humapalca	20,0
247	Quebrada a Caracarani por Hospicio-arriba	1,0
428	Quebrada a Colpitas antes borateras	7,0
213	Quebrada a Colpitas en borateras	1,5
227	Quebrada a Colpitas en Tacopa	0,0
207	Quebrada a Colpitas-Allane 2	4,0
208	Quebrada a Colpitas-Allane 3	1,0
212	Quebrada a Colpitas-poniente borateras	0,3
339	Quebrada Allane	15,0
438	Quebrada a Caracarani en SicaSica	20,0
185	Quebrada Huayla	4,0
454	Quebrada Huayla	2,0
107	Quebrada Putre	87,4
369	Quebrada Putre 1	0,2
371	Quebrada Putre 2	15,0

5.4 Reuniones y actividades relacionadas

En diciembre 2007 -Campaña 1- y abril 2008 -Campaña 4- se realizaron reuniones y encuentros con los organismos relacionados con el proyecto, las que se detallan a continuación.

Diciembre 2007:

Se realizaron 2 reuniones entre los consultores y la comunidad local. La primera se realizó en Poconchile el jueves 6 de diciembre y participaron además, la SEREMI de Agricultura y la DGA representada por don Waldo Contreras. Los agricultores del Valle de Lluta y algunos miembros de la Junta de Vigilancia representaron a la localidad. Las actividades realizadas fueron:

- Presentación del equipo consultor por parte de Waldo Contreras.
- Exposición sobre el estudio por parte de los consultores.
- Interacción con asistentes y llenado de fichas de participación.

Con respecto a la participación de la comunidad:

- Se mostró con una actitud positiva hacia el proyecto.
- La ficha de participación tuvo casi un 100% de respuesta. Se cuenta con datos de 22 participantes en la reunión que manifestaron sus distintos intereses y opiniones con respecto al proyecto. El resumen de la información recopilada y sus respectivas respuestas se presentan en el punto 6.2.

La segunda reunión fue con los representantes de Junta de Vigilancia presidida por Michael Humire, efectuada en Arica el viernes 7 de diciembre 2007. Se sugiere a la DGA solicitar a la Junta de Vigilancia del Lluta el informe de los análisis físicoquímicos realizados en el último tiempo por un consultor para esa junta. Esos informes incluirían información que parece interesante evaluar y considerar en este estudio de acuerdo a su mérito. Los consultores solicitaron esa información a la Junta de Vigilancia pero no fue entregada. De acuerdo a los representantes de la Junta de Vigilancia los análisis químicos serían realizados en convenio con la Universidad de Tarapacá.

El objetivo principal de estas reuniones era contarles acerca del proyecto a los involucrados de la zona, junto con recolectar información para las campañas a terreno y del proyecto en general. Además, se requería hacer partícipe a la comunidad y buscar apoyo de su parte.

Abril 2008:

Se realizó en la Dirección Regional de Aguas de la Región de Arica y Parinacota una reunión el día lunes 7 de abril 2008, donde se presentaron los resultados de las primeras campañas de monitoreo del río Lluta y tributarios.

Durante la reunión se discutieron aspectos relevantes de la zona entre los que se destacan:

- Posible contaminación difusa en el río Lluta por utilización de fertilizantes en agricultura.
- Denuncias de incumplimientos de RCA.
- El SAG mencionó la posibilidad de seguir monitoreando algunos puntos, después que se haya acabado el estudio.
- Durante los próximos meses llegará a la región el SERNAGEOMIN por lo que se contará con información más expedita referente a proyectos mineros en la zona.

Adicionalmente, se realizó un seminario dictado en la Universidad de Tarapacá (UTA), el cual estuvo enfocado en la problemática de la cuenca. El seminario contó con la participación del Dr. Aaron Packman, de Northwestern University (EEUU), experto internacional que visitó la cuenca durante la semana junto al equipo consultor y un profesional de la DGA.

El seminario se denominó: “Transporte, reacción y destino de contaminantes en sistemas acuáticos fluviales”. La presentación estuvo a cargo de la Dra. Lorena Cornejo, Universidad de Tarapacá. Se llevó a cabo el viernes 11 de abril del 2008, en la Universidad de Tarapacá, Campus General Velásquez, Arica.

Los expositores y temas respectivos se detallan a continuación:

- Dr. Gonzalo Pizarro: “Modelación de sistemas naturales complejos”.
- Dr. Pablo Pastén: “Reacción y especiación de contaminantes en aguas y sedimentos”.
- Dr. Aaron Packman: “Procesos de transporte en sistemas acuáticos fluviales”.

Con respecto a la asistencia, se puede decir que fueron alrededor de 25 personas, incluyendo académicos, alumnos de postgrado, profesionales de servicios.

El principal alcance fue generar una discusión académica con respecto al transporte, reacción y destino de contaminantes en sistemas acuáticos fluviales, lo cual se logró mediante las siguientes actividades:

- Presentación y discusión sobre los principios que controlan fuentes y transformación de contaminantes en sistemas fluviales.
- Presentación de los principios de modelación conceptual y cuantitativa de este tipo de sistemas.
- Discusión sobre la complejidad asociada a este tipo de sistemas.

Julio 2008:

Se realizó la presentación final de este proyecto el 28 de julio 2008 en las dependencias de la Dirección Regional de Aguas de la Región de Arica y Parinacota. Los presentadores fueron el Jefe de Proyecto y el Jefe de Proyecto alterno y contó con la presencia de

autoridades regionales (Seremi de OO.PP. y directores regionales DGA, DOH), representante del SAG, más la directiva de la Junta de Vigilancia del Lluta y representantes de comunidades indígenas a través de CONADI.

6. Análisis de información

6.1 Geoquímica

6.1.1 Introducción

Para tomar decisiones costo-efectivas y ambientalmente sustentables en relación a la gestión de la calidad del agua en el río Lluta es necesario entender los procesos y factores ambientales que controlan la calidad del agua en la cuenca. Esto implica ir más allá de la descripción de las tendencias espaciales y temporales de los parámetros y realizar un análisis integrado de la información disponible. El análisis debe enfocarse en identificar los procesos físicos, químicos y biológicos que controlan los parámetros de interés específico para este proyecto. Esta sección identifica los procesos y factores ambientales que controlan las concentraciones de boro y arsénico a nivel de cuenca y a nivel de escurrimientos de mayor importancia en la cuenca del río Lluta, sobre la base de la información disponible.

La calidad del agua en una cuenca es controlada por una interacción compleja de procesos y factores ambientales. Entender estas interacciones y procesos es en general una tarea que requiere de investigaciones y monitoreos hidroquímicos detallados a lo largo de horizontes de tiempo extendidos. Sin duda las campañas de terreno realizadas en el contexto de este estudio y la estadística hidroquímica obtenida por la DGA para la cuenca del Lluta establecen una base que permite proponer modelos conceptuales de trabajo preliminares para la gestión de la calidad del agua en el río Lluta. Sin embargo, debe entenderse que los modelos conceptuales planteados deberán revisarse sobre la base de nueva información que se obtenga a lo largo del tiempo. Más aún, los modelos conceptuales planteados permiten orientar nuevos esfuerzos de investigación que permitan entender mejor estos sistemas complejos.

Primero se presenta un modelo conceptual general de los procesos físicos, químicos y biológicos que interactúan para determinar la calidad del agua en una cuenca. Luego, se presenta con más detalle los factores y procesos biogeoquímicos específicos atinentes al boro y el arsénico. Finalmente, se discuten los procesos que, dadas las condiciones específicas de la cuenca del Lluta, son especialmente relevantes para la gestión del boro y arsénico en la cuenca.

6.1.2 Factores y procesos que controlan la calidad del agua en una cuenca

El diagrama presentado en la Figura 5 es una representación simplificada de los principales factores ambientales y procesos que controlan la calidad del agua en una cuenca. Esta representación se basa en la literatura especializada y ha sido adaptada para incluir los aspectos de especial interés para la cuenca del Lluta.

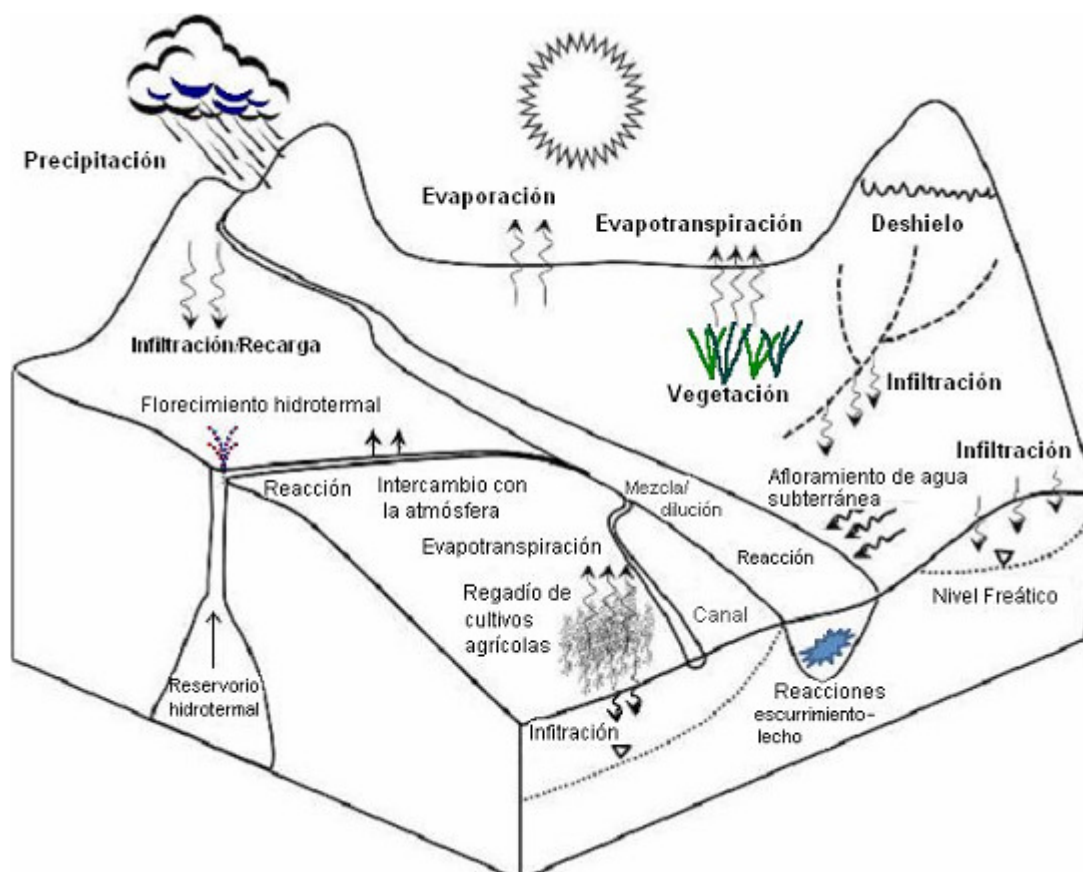


Figura 5. Procesos y factores que regulan la calidad del agua en una cuenca.

La calidad del agua es determinada por un conjunto de procesos físicos, químicos, y biológicos; incluyendo procesos de mezcla, dilución/concentración, y reacciones ácido/base, complexación, precipitación/disolución y oxidación/reducción. Los factores físicos que condicionan la calidad del agua están relacionados con hidrología superficial y la hidrología subterránea. La distribución espacio temporal de las precipitaciones unidas a la geomorfología del terreno y las propiedades de infiltración y evaporación, determinan los caudales superficiales, variable clave de la hidrología superficial. Las condiciones hidrológicas subterráneas que influyen en la calidad del agua dicen relación con las características hidráulicas de los acuíferos y la reactividad del material poroso que los compone. Asimismo, las contribuciones desde las aguas subterráneas a las superficiales - e.g., afloramientos, yacimientos hidrotermales-, y desde las aguas superficiales a las aguas subterráneas también pueden condicionar la calidad de las distintas corrientes y masas de agua.

En particular, para analizar la cuenca del río Lluta se debe considerar los siguientes factores y procesos:

- Aumento en la concentración de las especies químicas debido a altas tasas de evaporación y evapotranspiración.
- Dilución y disolución debido a escurrimiento superficial durante tormentas asociadas al Invierno Boliviano.

- Control ácido/base de reacciones de precipitación/disolución y complejación superficial asociadas al boro y arsénico.
- Escorrentía superficial derivada de yacimientos hidrotermales sulfurados y otros con boro y CO₂.
- Acidificación de aguas por oxidación de sulfuros por aireación.
- Mezcla y reacción en las juntas de cursos de agua superficiales.
- Sedimentación y resuspensión de partículas que contienen contaminantes debido a distintas condiciones hidráulicas espaciales y temporales en la cuenca.

Para entender el comportamiento del boro y arsénico y, en particular, cómo afectan los factores y procesos indicados anteriormente, es fundamental entender los aspectos principales que regulan el origen, transformación y destino del boro y arsénico en ambientes acuáticos. El concepto de trabajo fundamental es la especiación. La especiación corresponde a la forma química en que se encuentra la sustancia de interés. El arsénico y el boro pueden encontrarse como especies disueltas en la columna de agua, pueden encontrarse como parte de un mineral en suspensión o en un sedimento, o pueden encontrarse asociados a una superficie sólida que tenga afinidad por el elemento. La especiación del contaminante determina aspectos tan importantes como su toxicidad y la aplicabilidad de las tecnologías de remoción. Un contaminante que está presente como una especie disuelta tiene posibilidades de atravesar las membranas celulares y llegar a sitios donde puede ejercer su acción tóxica o inhibitoria. Un contaminante que está en la fase sólida no entra directamente a través de las membranas celulares y puede ser removido por procesos de sedimentación y filtración por medio granular, mientras que la fracción que se encuentra disuelta no es mayormente afectada por estos procesos. En consecuencia, para saber los factores que determinan el origen, transformación y destino del boro y el arsénico, es importante conocer los factores y procesos que determinan su especiación.

El boro y arsénico tienen similitudes y diferencias en cuanto a especiación. En términos generales, ambos son muy solubles, lo que significa que sólo soluciones con altas concentraciones forman precipitados bajo ambientes químicos determinados. Pero el boro y el arsénico tienen comportamientos distintos frente al ambiente redox del medio acuático y a su afinidad por superficies ambientales. El arsénico se puede encontrar comúnmente en ambientes acuáticos naturales bajo dos estados de oxidación (+3 y +5), mientras que el boro se encuentra sólo en un estado de oxidación (+3). Esto repercute en la reactividad y toxicidad del arsénico: el arsénico +5 (arsenato) es menos tóxico y más fácil de remover, mientras que el arsénico +3 (arsenito) es más tóxico y más difícil de remover de una solución. Por su parte, el boro se encuentra sólo en estado de oxidación +3 y en general es difícil de remover porque tiene poca afinidad con superficies ambientales, mientras que el arsénico tiene afinidad por superficies de oxihidróxidos metálicos -e.g. de aluminio y de fierro-. A continuación se discutirá con mayor detalle los factores que determinan la especiación del boro y arsénico.

a) Comportamiento ácido base y redox

Arsénico

El arsénico es un metaloide que forma oxianiones, encontrándose en aguas naturales principalmente como As(+3) inorgánico (AsO_3^{3-}) o como As(+5) inorgánico (AsO_4^{3-}). Estas especies pueden encontrarse con distintos grados de protonación, como se muestra en la Figura 6. Para el rango de pH relevante para aguas naturales se espera que predominen las especies H_2AsO_4^- , HAsO_4^{2-} para el caso de As(+5), y H_3AsO_3 para el caso del As(+3). Especies orgánicas de As, tales como compuestos metilados, se producen debido a la actividad biológica, pero sus concentraciones son usualmente despreciables. En consecuencia los parámetros que determinan la especiación del As en la fase acuosa son el pH y el potencial redox. El diagrama de la Figura 6, refleja la dominancia de las distintas especies de arsénico para diferentes pHs -eje horizontal- y potencial redox Eh -eje vertical- en condiciones de equilibrio químico. Los ambientes ácidos se ubican a la izquierda del diagrama y los ambientes básicos se ubican en el lado derecho del diagrama. Los ambientes reductores se ubican en la parte inferior, mientras que los ambientes oxidantes se ubican en la parte superior. Así, en los ambientes oxidantes tiende a predominar las especies de As(+5), mientras que en los ambientes reductores tiende a predominar las especies de As(+3). Esto es relevante porque las especies de As(+5) son menos tóxicas y más fáciles de remover que las especies de As(+3).

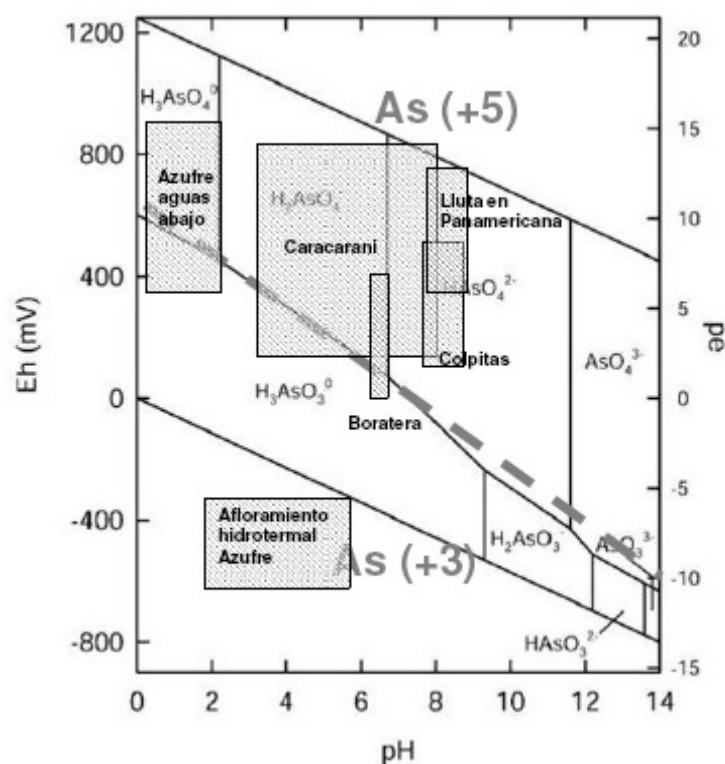


Figura 6. Diagrama pE-pH para el sistema arsénico. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Lluta. Adaptado de Snoeyink y Jenkins (Snoeyink and Jenkins, 1980).

Al graficar las condiciones generales de pH y Eh características de los cursos de agua principales, se observa que en general, bajo condiciones de equilibrio químico, en la cuenca del Lluta deberían predominar el As(+5), con excepción del nacimiento del Azufre, donde la presencia de sulfuros impondría condiciones reductoras, y en las borateras, donde

también se considera un ambiente reductor -por ejemplo, las concentraciones de oxígeno medidas en las borateras son cero-.

Respecto a la especiación ácido/base del As(+5), sólo para ambientes muy ácidos como el río Azufre, existirían especies neutras, lo que implica que sería difícil remover el arsénico en estas condiciones usando sistemas de tratamiento basados en atracción electrostática. Finalmente, casi el único sistema en que existe una variación en la especiación ácido base del arsénico es el Caracarani, debido al rango de pH en que se mueve.

Como se mencionó en el punto 4.1, se cuenta con información histórica de calidad proporcionada por la DGA que se presenta a continuación para el caso del arsénico.

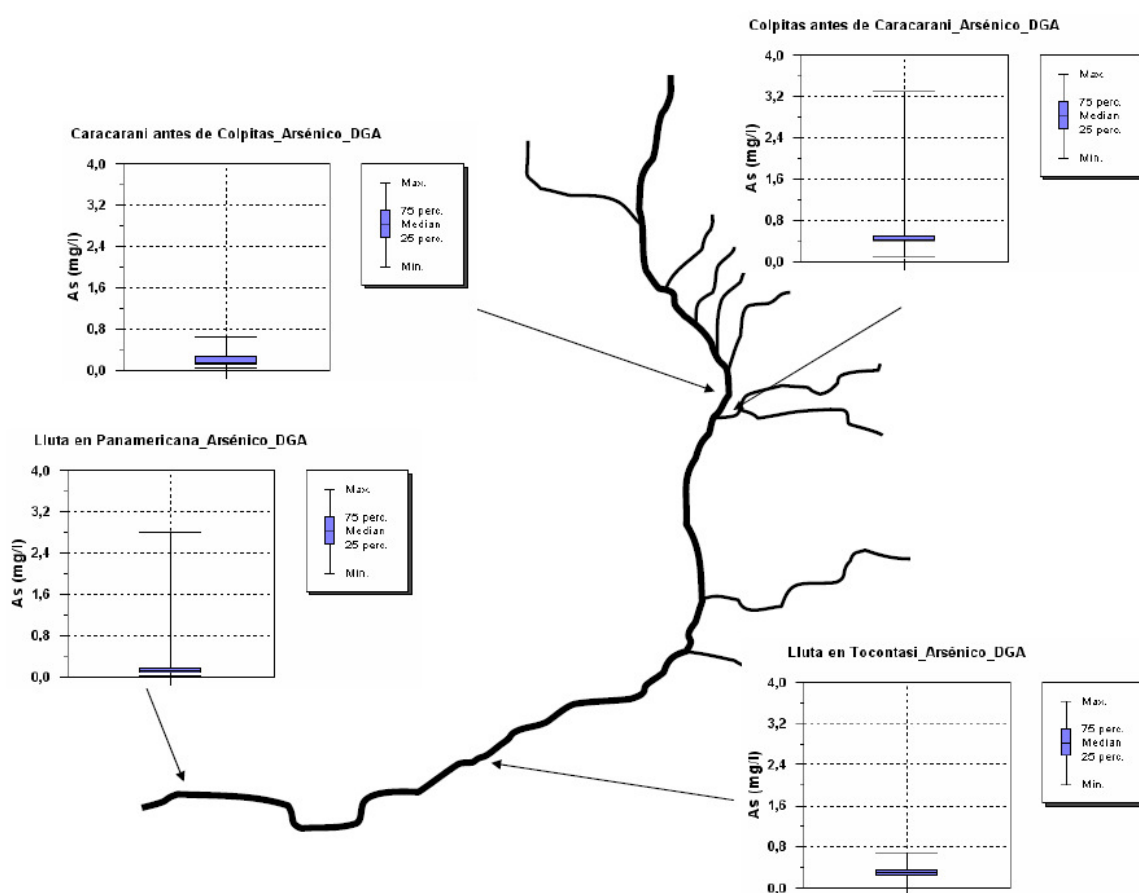


Figura 7. Datos históricos de la DGA para la concentración de arsénico.

La Figura 7 muestra que los datos históricos de concentración de As en la estación Caracarani antes de Colpitas presentan una tendencia más bien estable. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 0,009 y 0,164 mg/L As (Figura 8). Similar es la situación en Colpitas antes de Caracarani, donde la concentración de arsénico histórica muestra poca variación, exceptuando el *peak* puntual de 3,3 mg/L (19-3-03). Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 0,486 y 0,669 mg/L As (Figura 8). En la estación Lluta en Tocontasi la DGA reporta que la concentración de As no varía notablemente.

Consistentemente, las mediciones de este estudio fluctuaron entre 0,23 y 0,25 mg/L As total, es decir la variación fue mínima. Para Lluta en Panamericana, fuera del *peak* puntual de 2,8 mg/L (11-2-04), las mediciones de As de la DGA no presentan una dispersión considerable. El equipo consultor reportó valores entre 0,047 y 0,186 mg/L As.

En general, el arsénico total presente en la cuenca es bastante estable. No fue posible correlacionar los *peaks* de Colpitas antes de Caracarani y Lluta en Panamericana debido a las diferentes fechas en que se realizó el monitoreo de calidad. Se puede considerar que el río Azufre es la fuente principal de As, aunque el río Colpitas también presenta concentraciones considerables (del orden de 0,5 mg/L).

Cabe destacar que existen diferencias considerables en la cuenca en cuanto a la forma en que se encuentra el arsénico. Las mediciones históricas de la DGA consideran arsénico total, mientras que las de este estudio consideran tanto el arsénico total como mediciones de la fracción disuelta, la cual puede ser considerable como en el caso de los ríos Azufre, Caracarani y Colpitas. La mayor parte del arsénico en el río Lluta, con pHs más básicos, se encuentra asociado a partículas, y por este motivo probablemente el *peak* de 2,8 mg/L -que se encuentra asociado a una crecida de 28,3 m³/s- podría explicarse por el arrastre y resuspensión de sedimentos arsenicados del lecho del río. Además, el arsénico puede volver a la fase acuosa si hay descensos en el pH, debido a la solubilización de los oxihidróxidos de hierro en estas condiciones y por tanto la liberación del arsénico al agua. Una explicación más detallada de este fenómeno se presenta más adelante.

La Figura 8 resume las mediciones reportadas por el equipo consultor para las concentraciones totales de arsénico, las que corroboran los aportes de arsénico provenientes de los ríos Azufre y Colpitas.

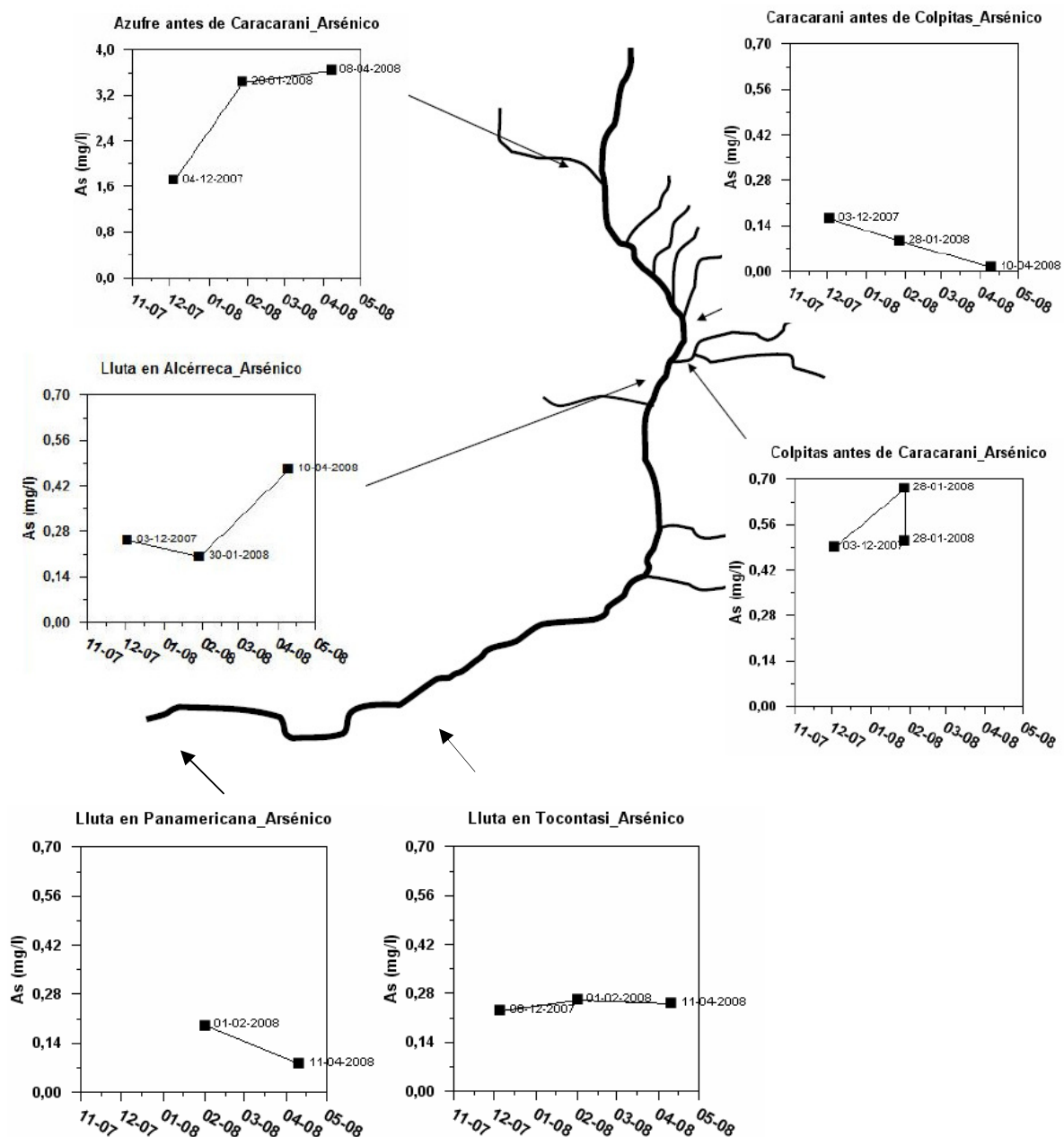


Figura 8. Mediciones de arsénico total reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

pH

Con respecto al pH, se presenta a continuación los gráficos de dispersión de las mediciones reportadas por la DGA.

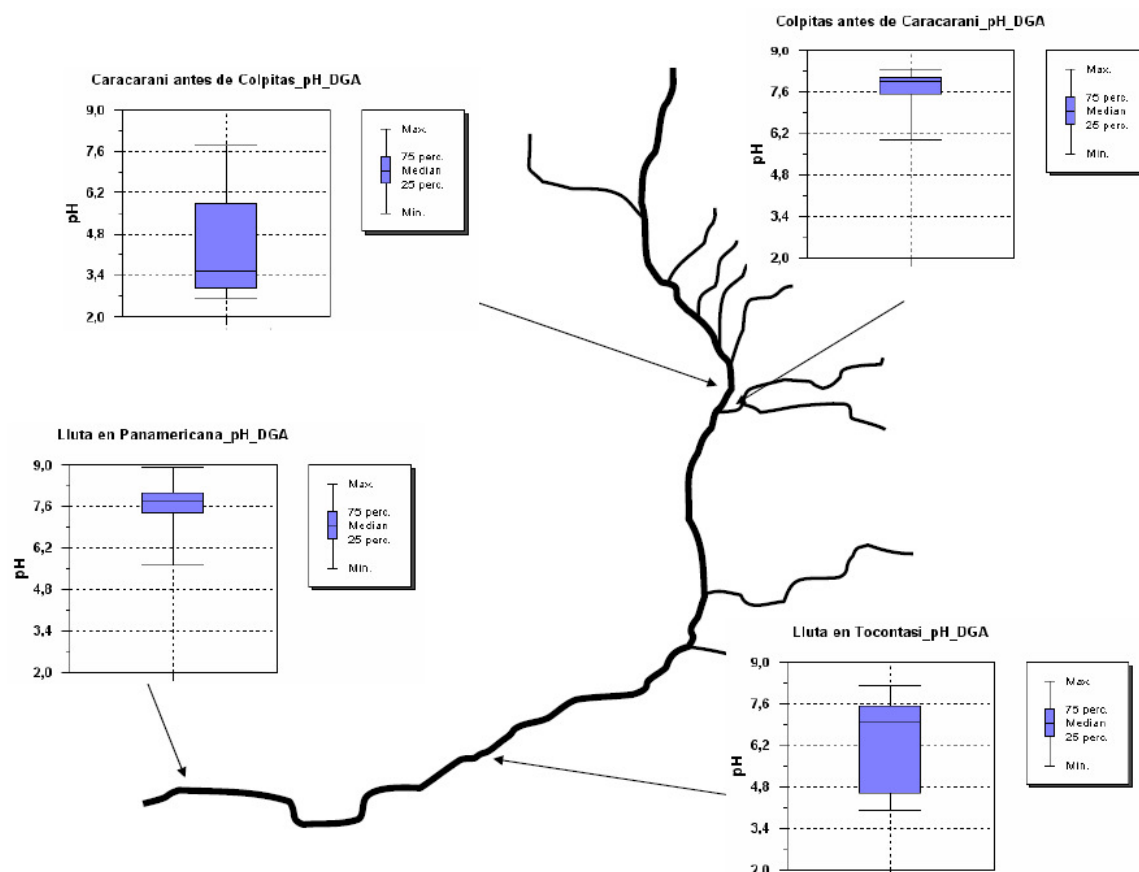


Figura 9. Datos históricos de la DGA para el pH.

La Figura 9 muestra que el pH histórico de la estación Caracarani antes de Colpitas es bastante variable, con tendencia a ser ácido. Una de las particularidades del parámetro pH es su relación logarítmica con la concentración (actividad) del H^+ . En términos simples, esto se traduce en que diferencias de 0,3 unidades en el pH (aparentemente una variación menor) implican cambios al doble o a la mitad de la concentración de H^+ , según sea una diferencia negativa o positiva, respectivamente. Un agua con pH 7 tiene el doble de concentración de H^+ que un agua con pH 6,7. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 2,9 y 4,6 (Figura 10). Mientras, para Colpitas antes de Caracarani los datos de la DGA muestran que es más bien estable y alcalino. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 7,9 y 8,3. Para el Lluta bajo, específicamente en Lluta en Tocontasi las mediciones de este estudio fluctuaron entre 7,1 y 8; exceptuando la temporada después de las lluvias (abril) donde se reportó 4,8. Aun así, está dentro del rango de las mediciones históricas de la DGA, que muestran una alta variabilidad, fluctuando entre neutro y ácido. En Lluta en Panamericana las mediciones reportadas por este estudio fluctuaron entre 7,9 y 8,2. Prácticamente no hubo variación. El pH histórico es estable y más bien alcalino.

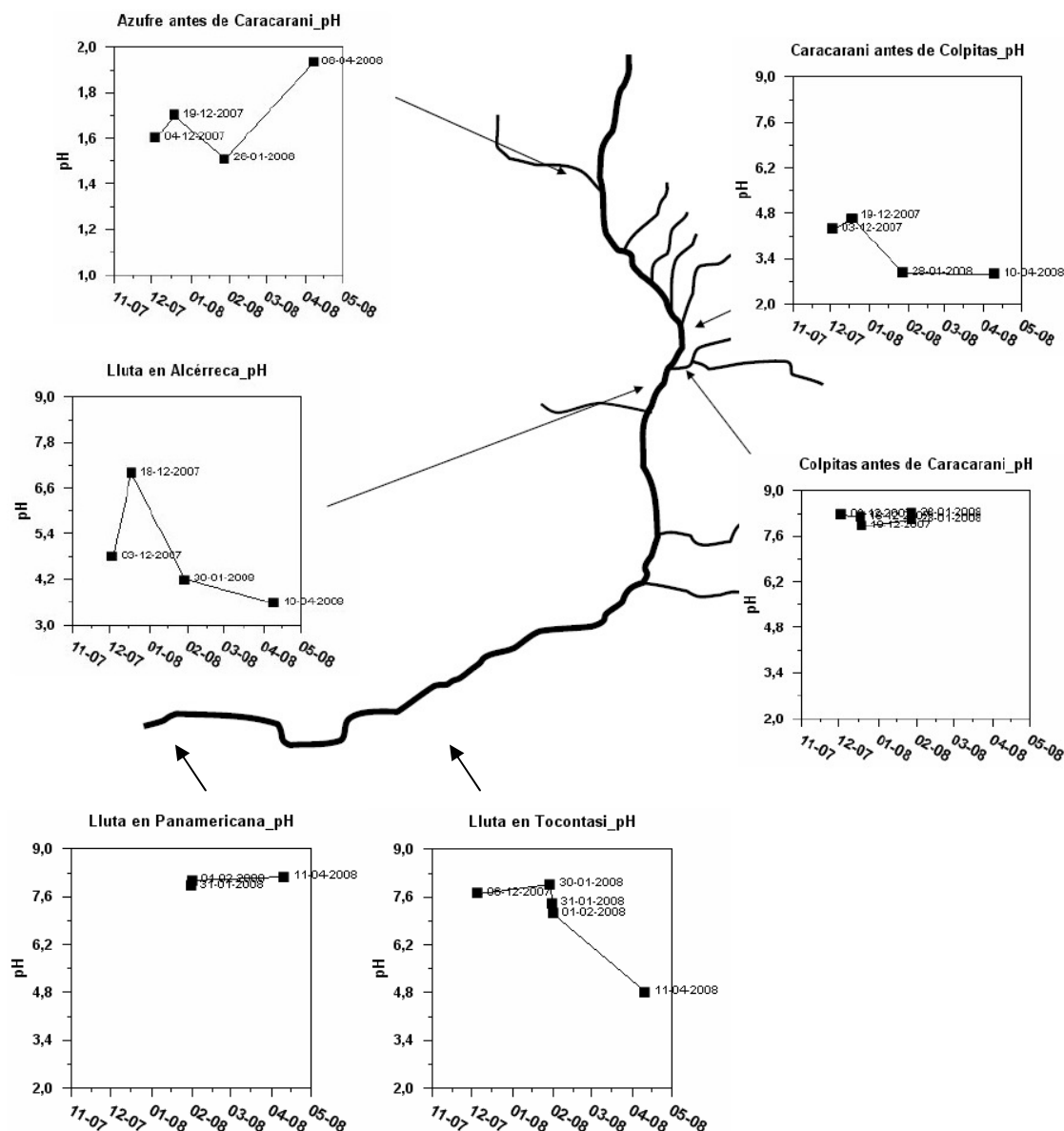


Figura 10. Mediciones de pH reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

La Figura 10 muestra la variabilidad espacial y temporal de las mediciones de pH realizadas en terreno por el equipo consultor. El río Azufre no sube de pH 2, Colpitas es prácticamente constante en torno a 8, mientras que Lluta en Alcérreca y Caracarani antes de Colpitas presentan una mayor variabilidad en el rango ácido.

Las mediciones de pH de este estudio se encuentran dentro del rango medido por la DGA, confirmando el comportamiento histórico. Se puede observar que el comportamiento de este parámetro en los distintos cursos de la cuenca es heterogéneo y altamente influido por el río Azufre.

Boro

En relación al boro, el panorama es mucho más simple. El boro no sufre transformaciones redox para el rango de ambientes encontrados en la cuenca del Lluta, lo que hace que la

variación de potencial redox -calidad de ambiente oxidante o reductor- no determine su especiación. Además del pH, el otro factor que importa para su especiación es la concentración total de boro. El diagrama de la

Figura 11 refleja la dominancia de las distintas especies de boro para diferentes pHs -eje horizontal- y concentraciones de boro -eje vertical, unidades logarítmicas-.

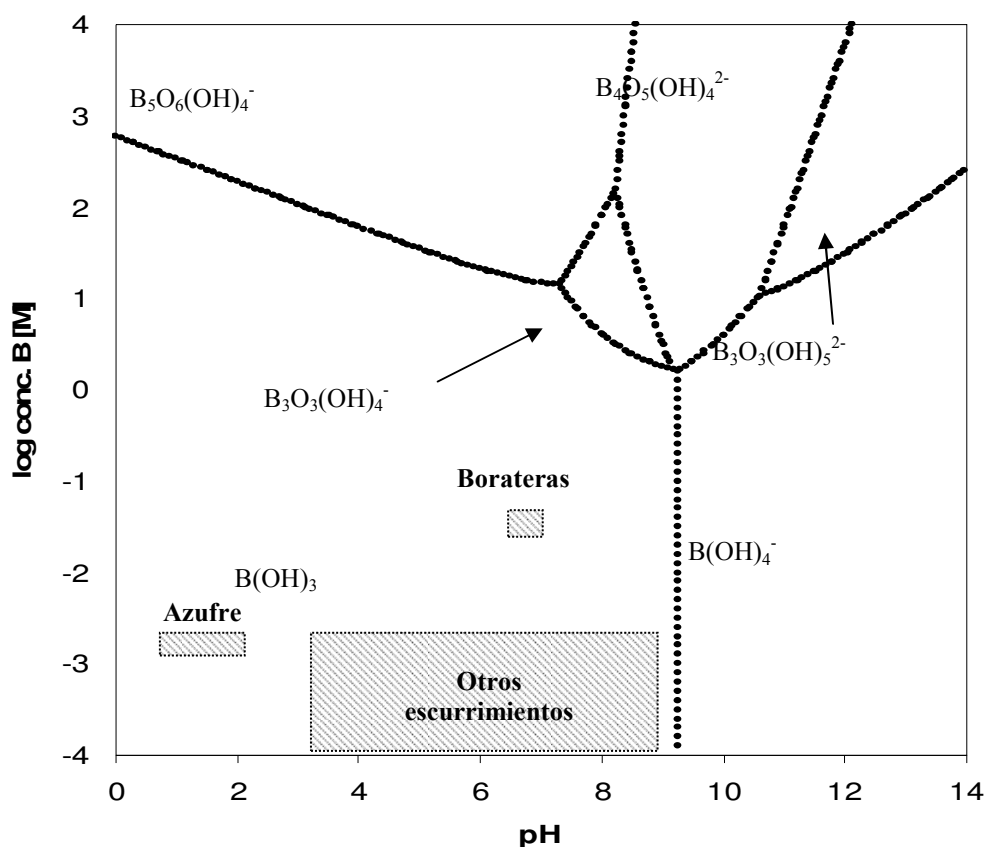


Figura 11. Diagrama pC-pH para el sistema boro. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Lluta.

Al graficar las condiciones generales de pH y concentración de boro para los distintos escurrimientos, se encuentra que la especie predominante de boro es el B(OH)₃ para todos los casos. Esto implica que aunque las concentraciones de boro son altas, la formación de poliboratos (especies con más de un átomo de boro, como B₃O₃(OH)₄⁻) no es significativa.

La Figura 12 presenta la variabilidad histórica de las concentraciones de boro reportadas por la DGA.

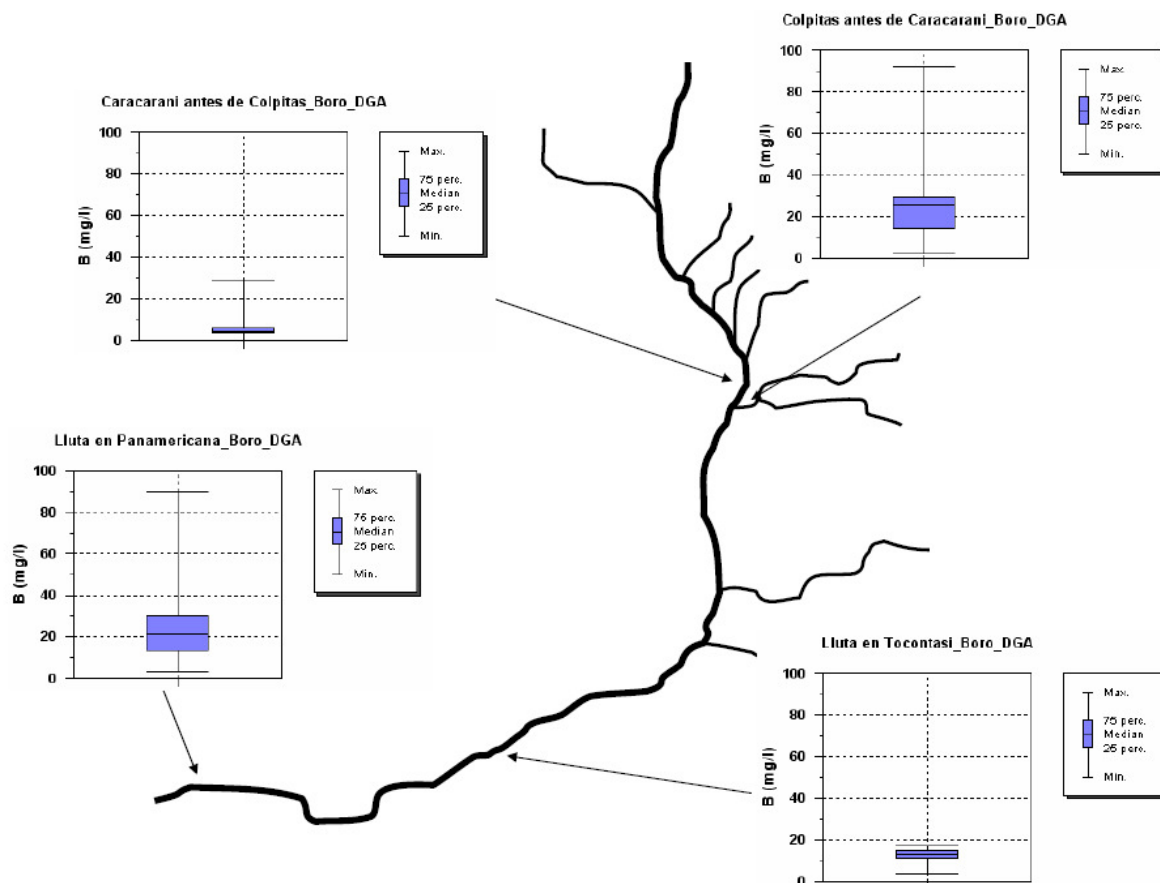


Figura 12. Datos históricos de la DGA para la concentración de boro.

Los datos históricos en la estación Caracarani antes de Colpitas indican que la presencia de boro se hace mucho más marcada hacia aguas abajo, presentando además poca dispersión. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 2,5 y 6,9 mg/L B (Figura 13). Mientras, en la estación Colpitas antes de Caracarani las mediciones de este estudio fluctuaron entre 25,3 y 36,4 mg/L B. La DGA ha reportado una variabilidad mayor. El máximo reportado de 92 mg/L (22-3-88) (bastante alejado de la mayoría de los datos) prácticamente coincide en el tiempo con el máximo de 90 mg/L en Lluta en Panamericana (28-3-88), y no coincide con un aumento de caudal significativo. Esto hecho podría avalar la teoría que la mayor parte del boro presente en el río Lluta es aportado por el río Colpitas. Para Lluta en Tocontasi los valores reportados por este estudio para la concentración de boro se encuentran dentro de lo reportado por la DGA: entre 6,6 mg/L en temporada seca (diciembre) y 13 mg/L luego de la temporada de lluvias (abril). La variabilidad histórica no pareciera ser significativa. Con respecto a la correlación entre los *peaks* de boro entre Lluta en Panamericana y Colpitas antes de Caracarani, no se realizó el monitoreo de calidad para Lluta en Tocontasi en dicha fecha. Por otro lado, en Lluta en Panamericana las concentraciones históricas de boro de la DGA son mayores y más dispersas que las de Lluta en Tocontasi. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 19 y 26 mg/L B. El *peak* de boro de 90 mg/L no coincide con un aumento de caudal significativo.

Tanto los datos históricos como los de este estudio indican que el río Colpitas es la principal fuente de boro para el río Lluta. Este cauce es más bien estable en cuanto a caudal, no así en lo que respecta a concentración de boro, por lo que se presume la

existencia de otros fenómenos asociados a los afloramientos termales identificados como borateras (con concentraciones del orden de 350 mg/L B) que desembocan al río Colpitas.

La Figura 13 presenta las mediciones de boro reportadas por el equipo consultor para los principales cursos de la cuenca. Éstas validan las mediciones de la DGA y aportan nueva información en cuanto al aporte significativo del río Azufre, que presenta concentraciones del orden de 30 mg/L, siendo comparable con el río Colpitas. Es decir, este curso no sólo es el principal aporte de arsénico, sino también de boro.

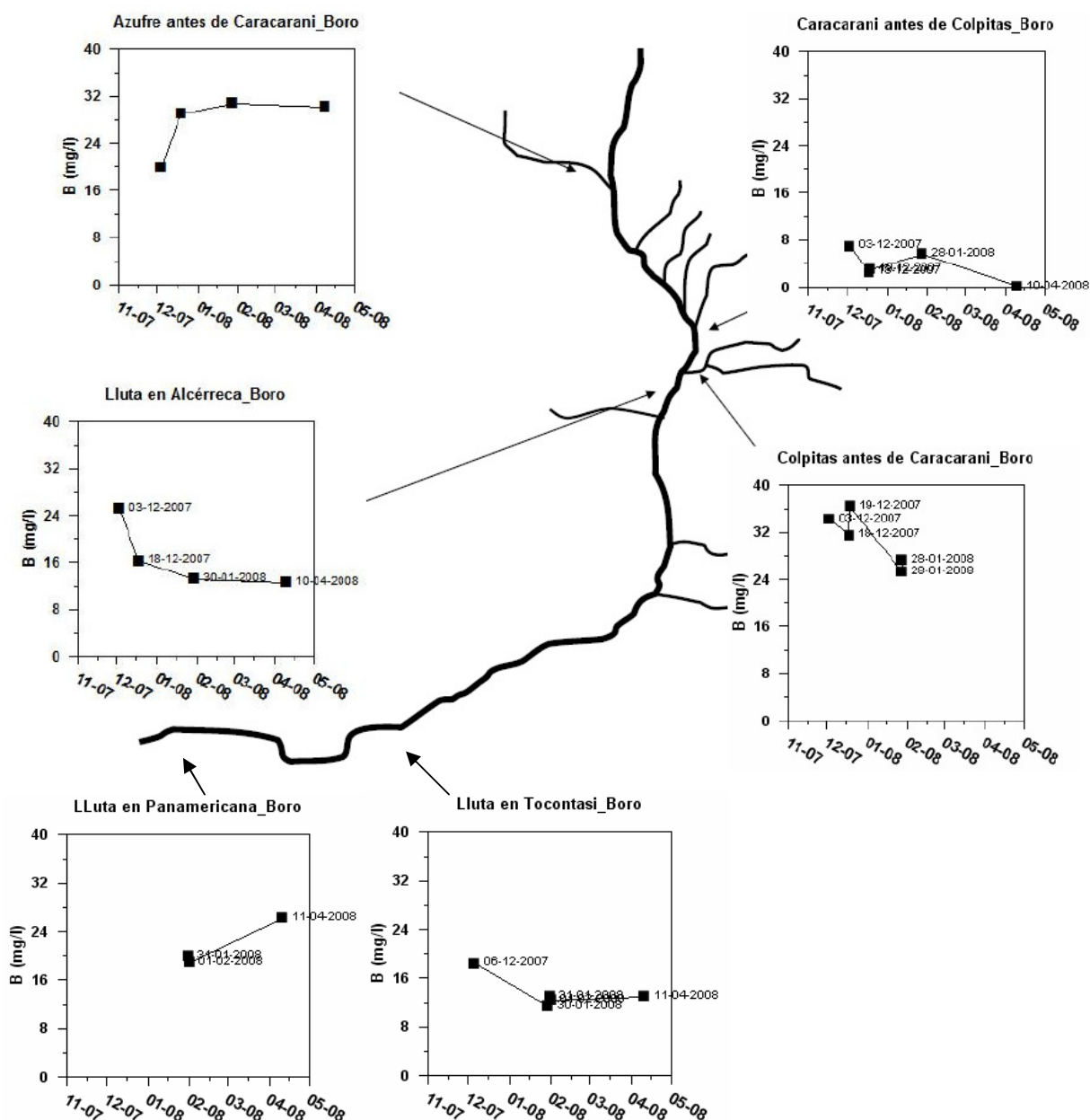


Figura 13. Mediciones de boro reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

Azufre

El azufre juega un rol relevante por dos aspectos. El sulfato es una especie de azufre que corresponde a uno de los dos aniones principales junto al cloruro, de modo que es en parte responsable de la salinidad del medio. Por otra parte, la oxidación de sulfuro a azufre elemental y a sulfato es una reacción que agrega protones al medio, produciendo una acidificación y por tanto un baja en el pH. En consecuencia, es importante entender el origen y transformación del azufre en el valle del río Lluta.

El diagrama de la Figura 14, refleja la dominancia de las distintas especies de azufre en función del pH -eje horizontal- y potencial redox Eh -eje vertical- en condiciones de equilibrio químico. Los ambientes ácidos se ubican a la izquierda del diagrama y los ambientes básicos se ubican en el lado derecho. Los ambientes reductores se ubican en la parte inferior, mientras que los ambientes oxidantes se ubican en la parte superior. Así, en los ambientes oxidantes tiende a predominar las especies de S(+6), mientras que en los ambientes reductores tiende a predominar las especies de S(-2).

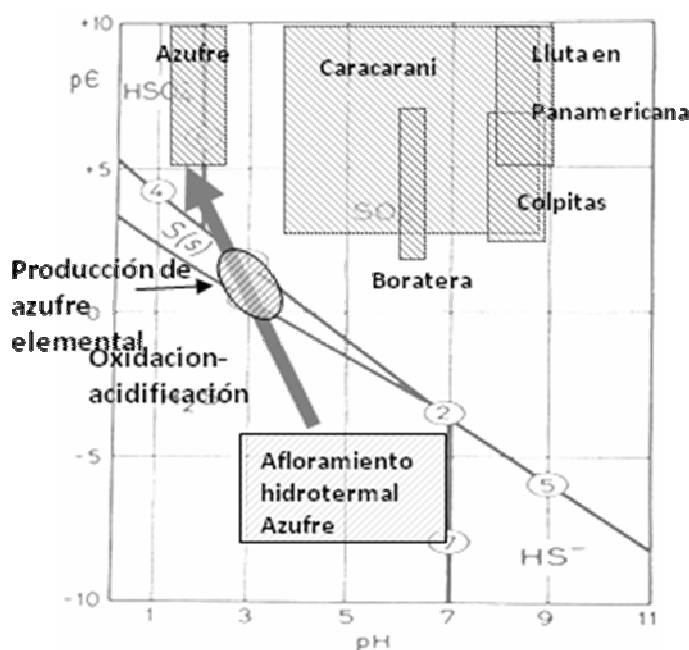


Figura 14. Diagrama pE-pH para el sistema azufre. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Lluta. Adaptado de Snoeyink y Jenkins (Snoeyink and Jenkins, 1980).

Al graficar las condiciones generales de pH y potencial redox para los distintos escurrimientos, se aprecia que el azufre se encuentra predominantemente como sulfato, excepto para el afloramiento hidrotermal que da origen al río Azufre que puede apreciarse en la Figura 15.



Figura 15. Afloramiento hidrotermal ($T=50^{\circ}\text{C}$) que da origen al Azufre.

En este punto, el fluido hidrotermal ya ha entrado en contacto con oxígeno y el sulfuro ha sufrido oxidación a sulfato más protones, con un pH de 1,8, sin embargo el agua tiene un nivel de $\text{O}_2=0,6 \text{ mg/L}$, y ya tiene una conductividad de $8,2 \text{ mS/cm}$. Aguas abajo, a una distancia de 30 metros, la temperatura ha bajado a 42°C , el pH ha bajado levemente a 1,7, la conductividad ha subido a $8,7 \text{ mS/cm}$ y $\text{O}_2=3,2 \text{ mg/L}$. Las mineralizaciones de color amarillo corresponderían a azufre elemental (S^0), que se forma como uno de los pasos intermedios para condiciones específicas de redox, tal como indica el diagrama de estabilidad termodinámico presentado anteriormente -Figura 14-.

Fierro

El fierro es relevante porque controla la especiación de los metales pesados cuando se encuentra en la forma de oxihidróxido. Esto es particularmente relevante para el arsénico, pues puede generar reservorios de arsénico en la forma de oxihidróxidos de fierro en sedimentos. Aunque se ha encontrado en la literatura afinidad de los oxihidróxidos de fierro por el boro, esta es muy baja comparada con las concentraciones de boro presentes en la solución.

El diagrama de la Figura 16, refleja la dominancia de las distintas especies de fierro para diferentes pHs -eje horizontal- y potencial redox Eh -eje vertical- en condiciones de equilibrio químico. Los ambientes ácidos se ubican a la izquierda del diagrama y los ambientes básicos se ubican en el lado derecho del diagrama. Los ambientes reductores se ubican en la parte inferior, mientras que los ambientes oxidantes se ubican en la parte superior. Así, en los ambientes oxidantes tiende a predominar las especies de $\text{Fe}(+3)$, mientras que en los ambientes reductores tiende a predominar las especies de $\text{Fe}(+2)$. Asimismo, en los medios ligeramente ácidos a básicos la forma de fierro predominante son los oxihidróxidos (simplificada en el diagrama como $\text{Fe}(\text{OH})_3$).

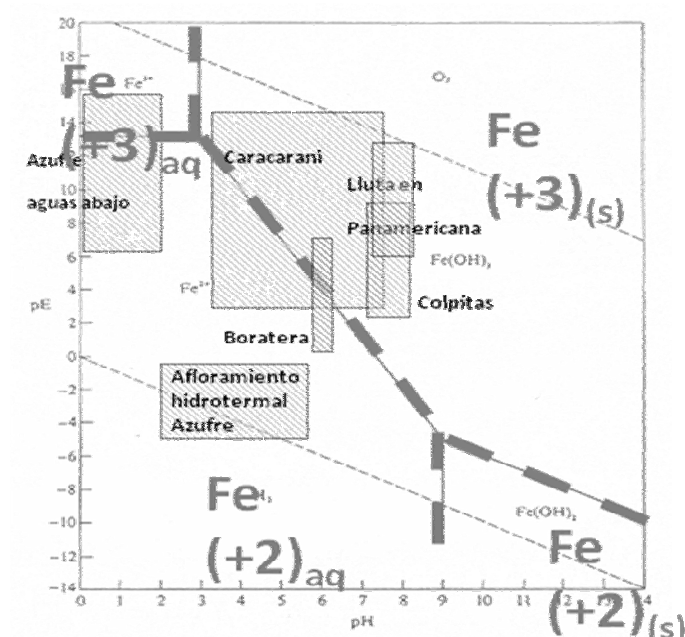


Figura 16. Diagrama pE-pH para el sistema hierro. Se muestra la ubicación de los distintos ambientes que se encuentran en la cuenca de río Llueta. Adaptado de Snoeyink y Jenkins (Snoeyink and Jenkins, 1980).

Al graficar las condiciones generales de pH y potencial redox para los distintos escurrimientos se aprecia que el hierro se encuentra predominantemente como hierro (+3) en su forma sólida, es decir como oxihidróxido. La excepción son los ambientes de bajo pH oxidantes en que se encuentra como $\text{Fe}(+3)$ soluble, y los ambientes reductores, en que se encuentra como $\text{Fe}(+2)$. Interesantemente, el Caracarani, dependiendo del pH puede tener disposición a que predomine la forma oxidada ($\text{Fe}(+3)$ como oxihidróxido) o la forma reducida (como $\text{Fe}(+2)$ soluble).

La Figura 17 y Figura 18, presentadas a continuación, ilustran la formación y acumulación de óxidos de hierro captadas en terreno. La Figura 19 y Figura 20, describen las capas de sedimentos presentes en Caracarani.



Figura 17. Formación de recubrimientos de óxidos de hierro sobre piedras en Caracarani aguas abajo de junta con Azufre.



Figura 18. Acumulación de óxidos de fierro sector azufrera Tacora.



Figura 19. Capa de sedimentos en Caracarani aguas abajo de la junta con el Azufre.



Figura 20. Capa de sedimentos en Caracarani aguas abajo de la junta con el Azufre.

La Figura 19 es en el cruce con el camino, aguas abajo de Caracarani en Humapalca, 1 km aguas abajo de la junta con el Azufre. Se observa una capa de color anaranjado y consistencia gelatinosa que sugiere acumulación de partículas de oxihidróxidos de hierro, muy probablemente con alto contenido de arsénico y otros metales asociados. La Figura 20 es de Caracarani justo antes de la junta con Colpitas. Ante eventos de crecidas estas capas superficiales de sedimento son arrastradas por la corriente.

Además de la formación natural de los oxihidróxidos de hierro, se realizaron experimentos en terreno con el fin de verificar la formación de hidróxidos al aumentar el pH, en vista a un posible sistema de remoción de arsénico basado en sorción. Para esto, se realizaron titulaciones alcalimétricas con NaOH, gracias a lo cual rápidamente se apreció la formación de flóculos de hidróxidos de hierro, tal como lo muestra la Figura 21.



Figura 21. Flóculos de hidróxidos de hierro formados gracias a la adición de base en Caracarani aguas abajo de la junta con el Azufre.

La muestra titulada del Caracarani después de Azufre (Figura 21), gracias a la adición de 12,7 meq/L, aumentó el pH desde 2,14 a 7,46, bajando su conductividad de 4,85 a 3,78 mS. La muestra original registró las siguientes concentraciones: 1,07 mg As/L y 30,5 mg Fe/L. Para verificar analíticamente la formación de hidróxidos de hierro que eventualmente sorbieron arsénico, se midieron los metales de interés en los sólidos formados, detectándose 2,7 mg As/ g sólido y 70,9 mg Fe/ g sólido. Esto equivale a un 20% de remoción de As y un 18% de remoción de hierro. No se detectó boro en las partículas, corroborando en terreno la tendencia del boro a predominar como la especie $B(OH)_3$.

La Figura 22 presentada a continuación permite ver los datos reportados por la DGA para la concentración de hierro.

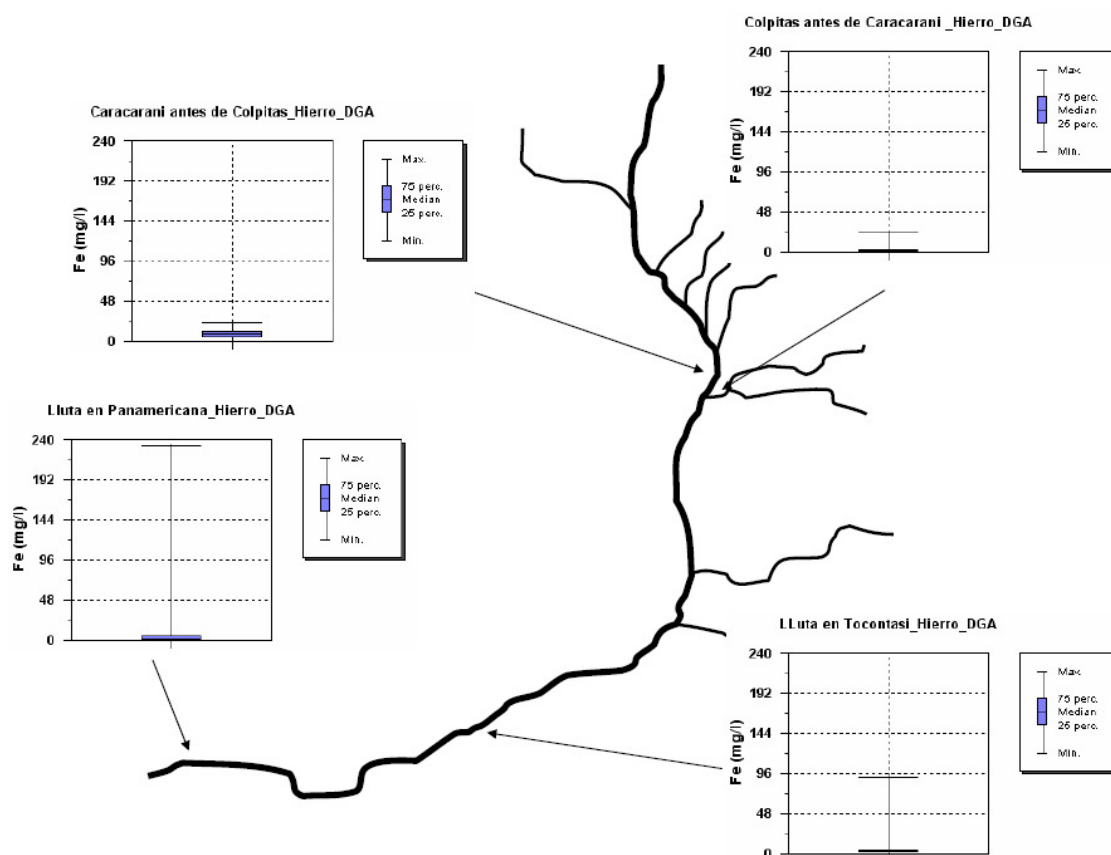


Figura 22. Datos históricos de la DGA para la concentración de hierro.

La Figura 22 muestra que históricamente las concentraciones de fierro en Caracarani antes de Colpitas presentan poca variabilidad. Los valores reportados por este estudio fluctuaron entre 2 y 8,8 mg/L Fe. Mientras, para Colpitas antes de Caracarani este estudio reportó valores entre 0,05 y 0,4 mg/L Fe (Figura 23). Este río es el que reporta las menores concentraciones histórica de Fe dentro de las estaciones de monitoreo de la DGA. Además, estos valores son bastante estables. En la estación Lluta en Tocontasi los valores reportados por este estudio fluctuaron entre 3,4 y 13,4 mg/L. El máximo de 91,6 mg/L (11-2-04) se escapa de la tendencia histórica de tener poca variabilidad para la concentración total de Fe. Finalmente para Lluta en Panamericana este estudio reportó valores entre 0,76 y 8,1 mg/L Fe. No existe mucha variación para este parámetro, fuera del *peak* puntual de 232 mg/L reportado en la misma fecha del *peak* de As (11-2-04).

Las mediciones históricas validan la correlación entre la concentraciones totales de Fe y As: los máximos coinciden en la crecida del 11-2-04, además el pH reportado de 5,7 (bastante más ácido que el 8,1 y 7,2 reportado antes y después de dicha fecha, respectivamente). Probablemente la crecida causó la acidificación de río, además de la resuspensión de sedimentos y/o partículas de oxihidróxidos de fierro y la consiguiente liberación de fierro y arsénico a la fase acuosa debido a la disminución de pH.

La Figura 23 muestra la distribución espacial de las mediciones de fierro realizadas por el equipo consultor. El río Azufre es el que aporta mayormente este metal a los cursos aguas abajo, con concentraciones del orden de 100 mg/L. Por otro lado, el río Colpitas antes de Caracarani es el que presenta las concentraciones más bajas, no superando los 0,4 mg Fe/L.

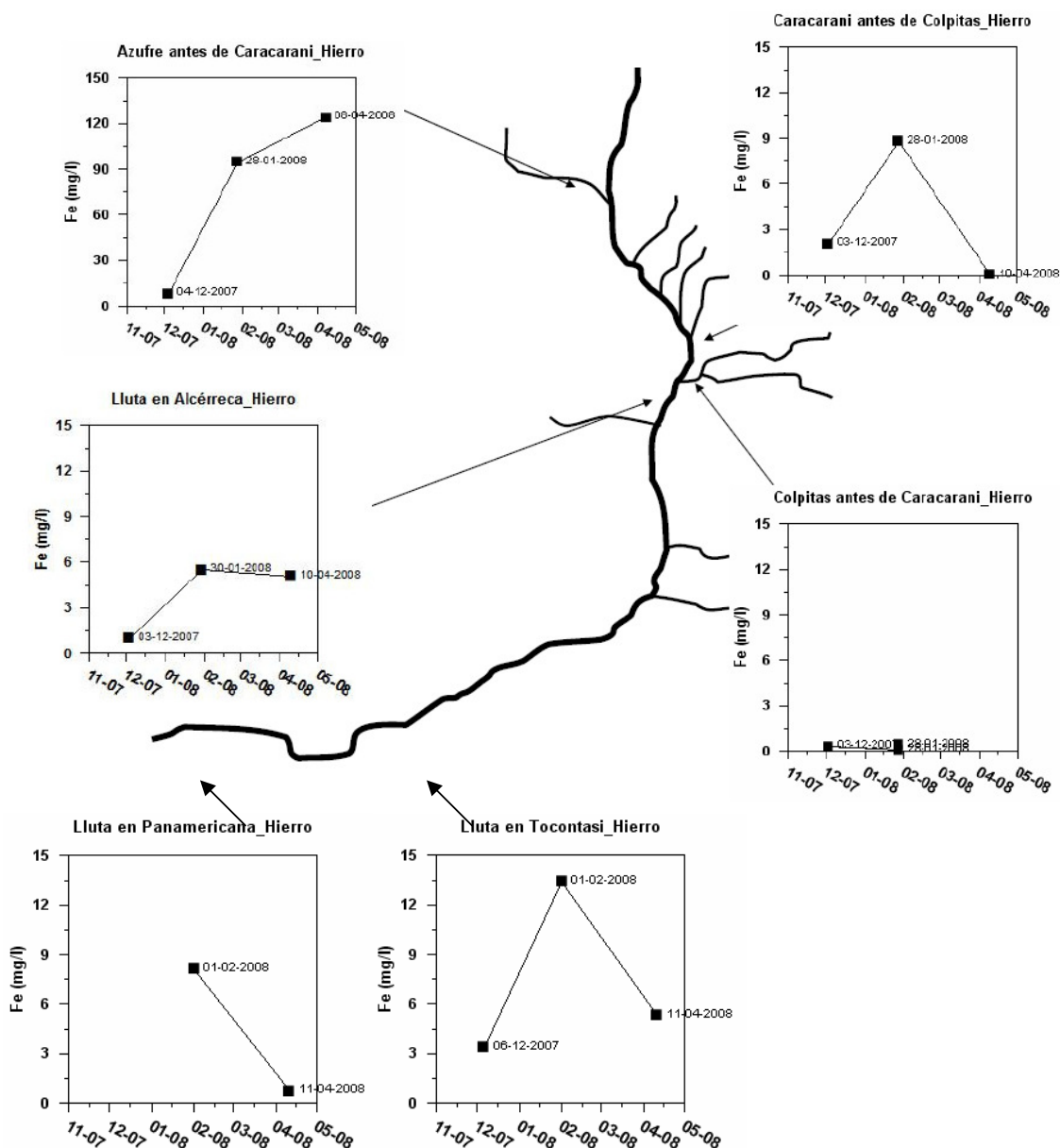


Figura 23. Mediciones de hierro total reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

b) Precipitación/disolución/concentración

Los procesos de precipitación/disolución/concentración son relevantes para entender el origen y comportamiento a lo largo de la cuenca de las sales disueltas. La alta evaporación en la parte alta de la cuenca produce una concentración creciente de las sales disueltas en el agua, llegando a la saturación y eventual precipitación de distintos minerales. Para algunos minerales esta formación de minerales es extremadamente dependiente del pH, mientras que para otros minerales se produce a partir de concentraciones muy bajas de los iones. Asimismo, la exposición de los depósitos evaporíticos a flujos de aguas provenientes de las tormentas altiplánicas puede solubilizar las costras salinas y transportar los iones disueltos aguas abajo. Las concentraciones de los iones aportados por la solubilización de sales estarán controladas por el ambiente químico del cuerpo receptor, incluyendo la

composición iónica del medio, el pH, la temperatura, y la composición mineralógica de las fases sólidas presentes.

Tal como se indicó anteriormente, dada la escasa información disponible y lo complejo de las reacciones de precipitación/disolución, y las interacciones con otros tipos de procesos es imposible explicar completamente los cambios de las composiciones químicas a través de la cuenca. No obstante estas limitaciones, es posible identificar o explicar los aspectos que controlan la presencia de sales disueltas, y la precipitación y disolución de minerales.

Uso de cálculos termodinámicos como marco interpretativo

Cuantitativamente, la factibilidad para la formación o disolución de los distintos minerales se puede analizar combinando ecuaciones de equilibrio químico con balances de masa para los distintos iones presentes en la solución. La complejidad de las composiciones químicas de las aguas en la cuenca y la cantidad de reacciones involucrada requiere de una herramienta de modelación geoquímica para hacer los cálculos y estimaciones de factibilidad termodinámica. Si bien es cierto, estos cálculos tienen las limitaciones que se indican más adelante, son extremadamente útiles para discriminar lo que es posible de lo imposible desde el punto de vista termodinámico. Los cálculos termodinámicos geoquímicos realizados en este estudio fueron hechos con PHREEQC, desarrollado por el US Geological Survey (Parkhurst and Appelo, 1999) e implementado a través de las interfaces PHREEQC for Windows y PHREEQC Interactive.

Los cálculos termodinámicos realizados por este tipo de herramientas y las interpretaciones basados en éstos están limitados por dos aspectos: (i) la cinética de las reacciones químicas: no todas las reacciones ocurren instantáneamente y muchas ocurren a una velocidad tal que los cálculos termodinámicos no reproducen las condiciones observadas en terreno; (ii) la completitud de la base de datos geoquímica: las bases de datos usadas para los cálculos termodinámicos en este estudio consideran una amplia gama de reacciones y fases minerales, pero es posible que existan reacciones o fases minerales no consideradas debido a que no han sido todavía estudiadas por la comunidad científica.

A continuación se presentan estimaciones termodinámicas aplicadas al caso de la cuenca del río Lluta, poniendo énfasis en la solubilidad de los minerales de boro (factor que controla su presencia en el agua y la factibilidad de su remoción por precipitación) y en la especiación química de las distintas matrices acuosas, que proporcionan un marco interpretativo para las observaciones de campo.

Mineralogía y análisis termodinámico de solubilidad de minerales de boro

La solubilidad de las sales de boro es relevante porque puede ayudar a entender los procesos que limitan los aportes de boro a las corrientes de agua y a la vez pueden sugerir esquemas de tratamiento basados en precipitación química.

En la actualidad se reconocen más de 220 minerales de boro que ocurren naturalmente. En la mayoría, el boro se encuentra asociado a oxígeno, con la excepción de tres en que se encuentra asociado a flúor (Anovitz and Grew, 1996).

La Tabla 3 presenta un listado de minerales de boro que inicialmente se podrían considerar potencialmente presentes en el área de estudio, de acuerdo a la ocurrencia de los minerales de boro descrita en Anovitz y Grew (1996). Además del nombre, se presenta la estequiometría (fórmula química), un ejemplo de composición química de una muestra, las características y ocurrencia, y la disponibilidad de datos termodinámicos. El análisis de esta tabla sugiere considerar los siguientes minerales de boro para análisis termodinámico de solubilidad para el área de estudio: bórax, hidroboracita, colemanita, sassolita (ácido bórico) y ulexita. No se consideró para los cálculos termodinámicos desde el mineral bandylita en adelante debido a la asociación principal con especies presentes minoritarias (cobre, cromo), la ocurrencia en otros ambientes (metamórficos), y la disponibilidad de información termodinámica. De los minerales en la Tabla 3, la hidroclorborita es el único mineral no considerado en los cálculos termodinámicos y que podría tener relevancia, pero desafortunadamente no se cuenta con sus datos termodinámicos.

Tabla 3. Minerales de boro potencialmente relevantes (elaboración propia a partir de Anovitz y Grew (2002), y de Bladh et. al (2001) (Bladh et al., 2001)). Se presentan primero aquellos para los que se conocen datos termodinámicos.

Nombre	Estequiometría	Características y ocurrencia	Datos termodinámicos
Bórax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 100% Bórax	Lechos secos, eflorescencia en suelos hidrotermales. Ampliamente distribuido.	Si
Colemanita	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ B_2O_3 50,70 % MgO 0,10 % CaO 27,31 % H_2O 21,87 %	Lechos secos, salares, evaporitas. Ampliamente distribuido.	Si
Hidroboracita	$\text{CaMgB}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Evaporítico. Varias localidades incluyendo Taltal, Antofagasta, Chile.	Si
Sassolita (ácido bórico)	H_3BO_3 B_2O_3 57,19 % H_2O 42,81 %	Fumarolas, eflorescente en colemanita, sistemas hidrotermales. Ampliamente distribuido.	Si
Ulexita	$\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{B}_{10}\text{O}_{18} \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ B_2O_3 43,07 % CaO 13,92 % Na_2O 7,78 % H_2O 35,34 %	Evaporita.	Si
Bandylita	$\text{CuB}(\text{OH})_4\text{Cl}$ Cu 34,94 35,73 % B_2O_3 23,35 24,07 % Fe_2O_3 0,35 % MgO 0,05 % CaO 0,05 % Na_2O 0,40 % Cl 19,47 19,94 % H_2O 19,60 20,26 % SO_3 0,05 % insol. 1,84 %	Mineral secundario de cobre. Identificado en el área de Calama.	No
Dravita	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$ SiO_2 36,52 % TiO_2 0,17 % B_2O_3 10,32 %	Rocas metamórficas, pegmatitas, y algunas rocas ígneas básicas. Ampliamente distribuido.	No

	Al ₂ O ₃ 33,41 % FeO 0,30 % MnO 0,57 % MgO 11,25 % CaO 0,42 % Na ₂ O 2,34 % K ₂ O 0,57 % F 0,12 % H ₂ O 3.76 %		
Dumortierita	(Al,X) Al ₆ BSi ₃ O ₁₆ (O,OH) ₂ SiO ₂ 29,99 % TiO ₂ 1,56 % B ₂ O ₃ 6,09 % Al ₂ O ₃ 61,49 % Fe ₂ O ₃ 0,06 % MgO 0,10 % CaO 0,02 % H ₂ O 0,60 %	Rocas metamórficas, pegmatitas, rocas alteradas hidrotermalmente. Ampliamente distribuido.	No
Hidroclorborita	Ca ₂ B ₄ O ₄ (OH) ₇ Cl*7H ₂ O SO ₃ traza B ₂ O ₅ 29,50 % FeO 0,04 % CaO 23,31 % Na ₂ O traza Cl 7,6 % H ₂ O 41,91 %	Evaporita. Salar de Carcote, Chile.	No
Iquiquequeita	K ₃ Na ₄ Mg(Cr ⁶⁺ O ₄)B ₂₄ O ₃₉ (OH)*12H ₂ O B ₂ O ₃ 57,0 % CrO ₃ 6,8 % MgO 2,9 % Na ₂ O 8,2 % K ₂ O 10,5 % H ₂ O 14,6 %	Depósitos de nitrato. Zapiga, Chile.	No
Ludwigite	Mg ₂ Fe ³⁺ BO ₅ SiO ₂ 0,49 % TiO ₂ 0,05 % B ₂ O ₃ 17,43 % Al ₂ O ₃ 0,62 % Fe ₂ O ₃ 39,00 % FeO 3,17 % MnO 0,33 % MgO 39.12 % CaO 0,11 % H ₂ O 0,15 %	Metamórficos de contacto de alta temperatura. Ampliamente distribuido.	No

La Tabla 4 presenta el resumen de las reacciones de disolución de los principales minerales de boro. Esta tabla permite observar que estas disoluciones son dependientes del pH del agua. El borato es en sí una especie ácido base ($\text{H}_3\text{BO}_3 = \text{H}_2\text{BO}_3^- + \text{H}^+$ pKa=9,2) y la solubilización de los minerales de boro requiere un H^+ o libera un OH^- . Además, la matriz acuosa ya tiene concentraciones no despreciables de los iones que se liberan al medio (e.g., 0,17 M NaCl). Consecuentemente, el cálculo de la solubilidad se realizó para distintos pHs y composiciones iónicas del agua. Los resultados se presentan en la Figura 24, Figura 25, Figura 26, Figura 27 y Figura 28. Los distintos minerales muestran solubilidades mínimas en el rango de pH entre 9 y 10, con incrementos importantes para pHs menores a 8.

Tabla 4. Reacciones de disolución y constantes termodinámicas usadas en los cálculos de solubilidad. Aunque esta tabla omite reacciones de complexación para especies acuosas derivadas de la solubilización, éstas se consideraron en los cálculos.

Reacción de disolución	log K
Bórax $\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ = 2\text{Na}^+ + 4\text{B}(\text{OH})_3 + 5\text{H}_2\text{O}$	12,0395
Colemanita $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}^{++} + 6\text{B}(\text{OH})_3$	21,5148
Hidroboraquita $\text{MgCaB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O} + 4\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + 6\text{B}(\text{OH})_3$	20,3631
Sassolita (ácido bórico) $\text{B}(\text{OH})_3 = \text{B}(\text{OH})_3$	-0,1583
Ulexita $\text{Na}_2\text{Ca}_2\text{B}_{10}\text{O}_{18} \cdot 16\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{Ca}^{++} + 2\text{Na}^+ + 10\text{B}(\text{OH})_3 + 6\text{OH}^-$	-55,8

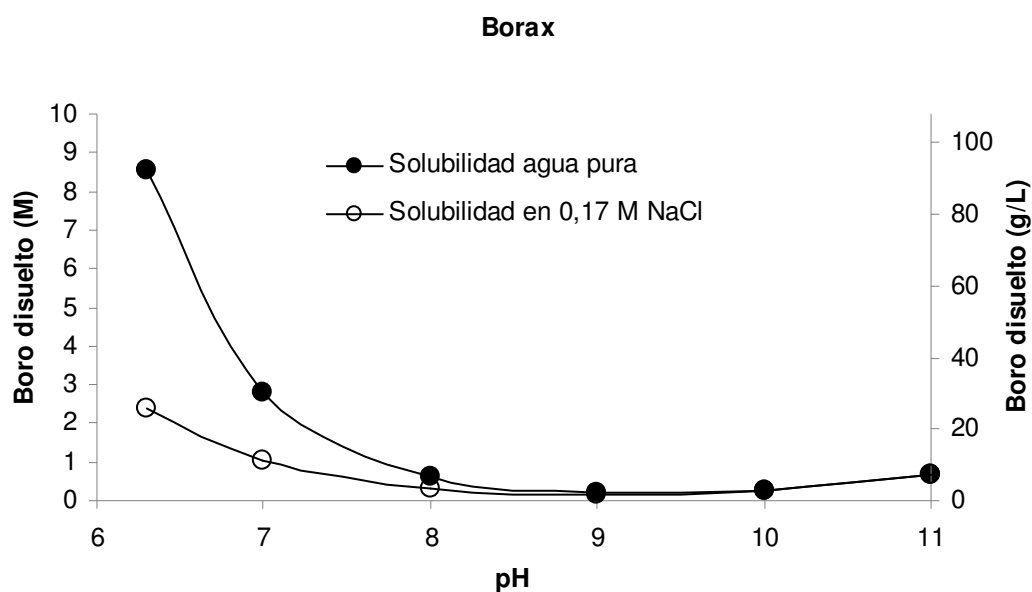


Figura 24. Solubilidad del bórax en función del pH.

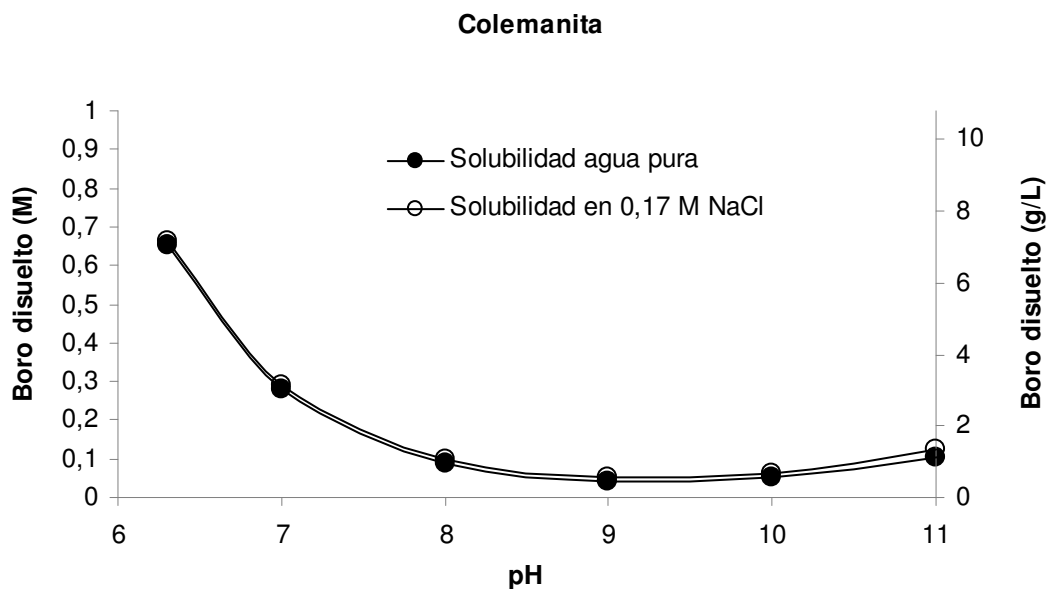


Figura 25. Solubilidad de la colemanita en función del pH.

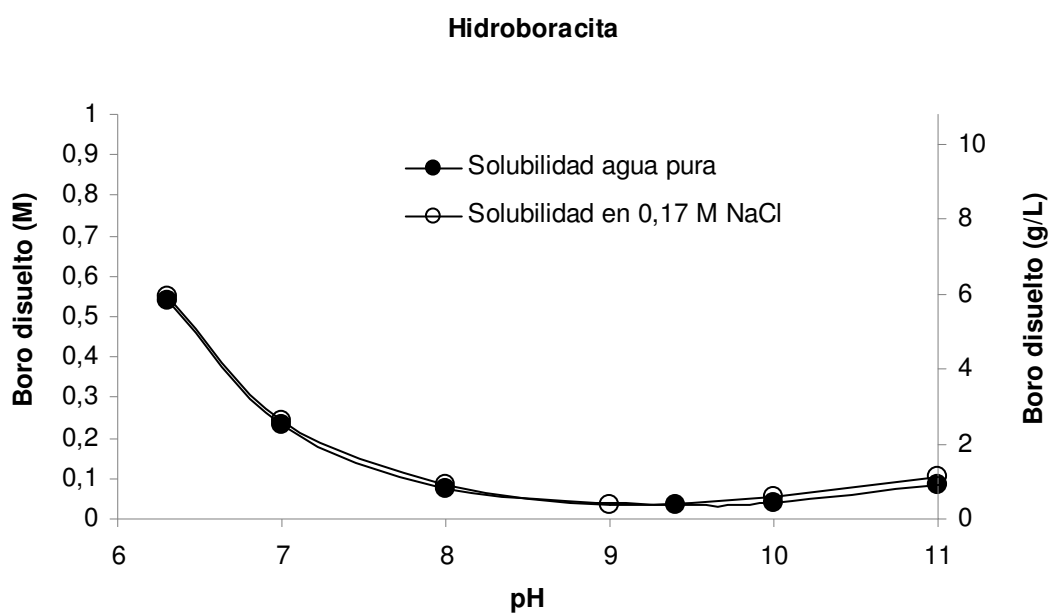


Figura 26. Solubilidad de la hidroboracita en función del pH.

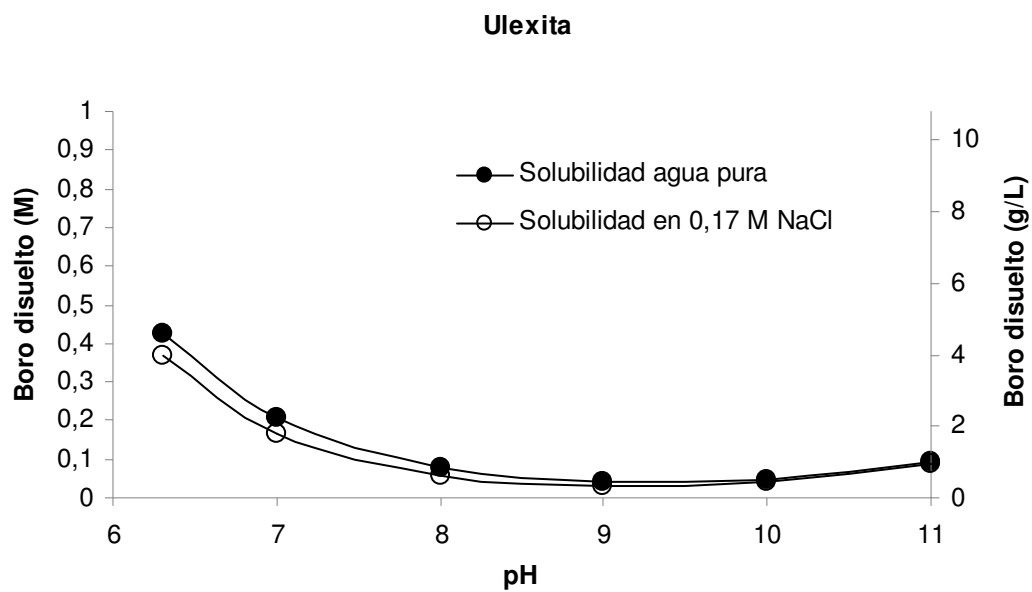


Figura 27. Solubilidad de la ulexita en función del pH.

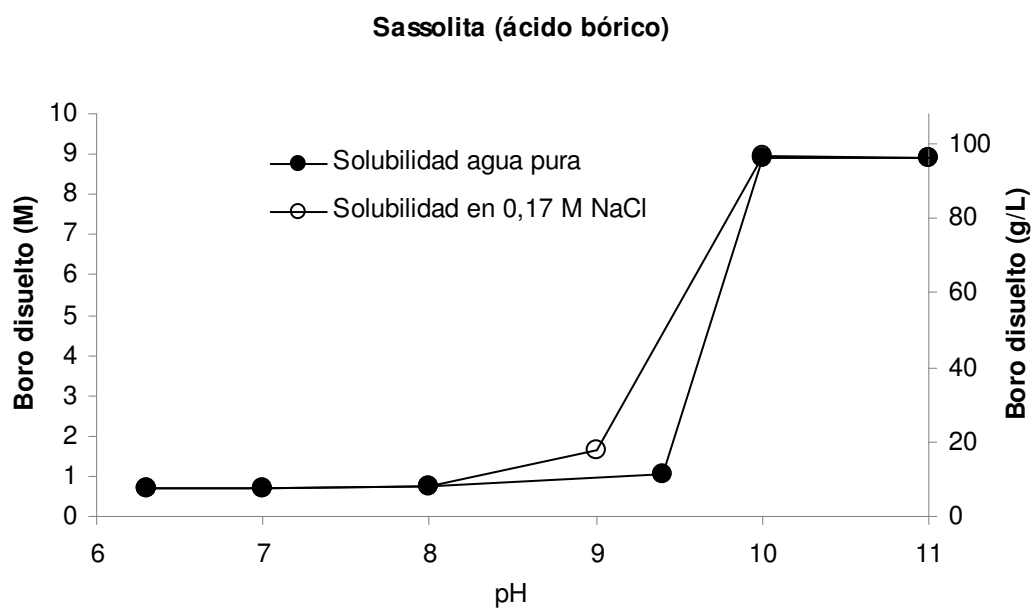


Figura 28. Solubilidad de la sassolita en función del pH.

El análisis de los gráficos anteriores y los valores indicados permite realizar los siguientes alcances:

- La solubilidad es dependiente del pH con mínimos para pH sobre 9. Para pHs bajo 8 y sobre 10 la solubilidad de los minerales de boro aumenta considerablemente.
- El pH óptimo para la remoción de boro es levemente superior a 9.
- No existe una diferencia importante y consistente para la solubilidad en agua pura versus agua con 0,17 M NaCl.
- La colemanita, hidroboracita, y ulexita tienen comportamiento similar, con solubilidades del orden de 0,5 g/L de B, mientras que el bórax y la sassolita (ácido bórico) tienen solubilidades 10 veces más altas (5 g/L). La sassolita tiene un comportamiento disímil, pues su solubilidad aumenta con el pH en forma importante después de pH=9 y se mantiene relativamente constante bajo pH=8.
- Para el pH de la boratera (pH=6,3) la solubilidad de los minerales de boro es extremadamente alta, por sobre los 0,3 g/L medidos en terreno. Esto sugiere que el paso limitante es bien la disponibilidad de los minerales de boro, la disponibilidad de protones (suplementados por el CO₂ disuelto en este caso), y la cinética de disolución.
- Los esquemas de precipitación deben proporcionar concentraciones elevadas de los iones que coprecipitan para reducir las concentraciones de boro en solución. Asimismo, la adición de reactivos debería tender a generar pHs básicos (levemente sobre 9), de modo de encontrar condiciones de menor solubilidad.
- Bajo las condiciones anteriores, es difícil que los minerales de boro precipiten en ambientes acuosos. La ocurrencia de minerales de boro tales como los indicados en la Tabla 3 es posible entonces sólo como el producto de la evaporación del agua formando costras evaporíticas.

Finalmente, es importante destacar que el boro puede asociarse a fases sólidas en la forma de reacciones de sorción. Comparado con el arsénico u otros metales y metaloides, la afinidad de los oxihidróxidos por el boro es menor. Sin embargo, se esperaría una sorción/coprecipitación asociada a óxidos de hierro y óxidos de aluminio, y también aluminosilicatos.

Mineralogía de sólidos observados en terreno

En terreno se pudo observar la presencia de sólidos como los que se muestran a continuación en la Figura 29 y Figura 30 en las que puede verse los minerales formados en el río Azufre. Con el fin de conocer los minerales que serían termodinámicamente factibles de formarse en el río Azufre dadas las condiciones del medio y la calidad del agua de éste, se modeló en PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999) la especiación de los componentes químicos presentes en el agua, usando como datos de entrada las mediciones de terreno y de laboratorio realizadas en este estudio y simulando condiciones de equilibrio. Los resultados indican que las especies disueltas predominantes son B(OH)₃, Ca²⁺, Cl⁻, Fe³⁺,

K^+ , Mg^{2+} ; mientras que las principales especies que precipitarían corresponden a sales sulfatadas como la jarosita $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, óxidos de aluminio, aluminosilicatos como la nontronita cálcica $Ca_{0,165}Fe_2Al_{0,33}Si_{3,67}H_2O_{12}$, sílices SiO_2 y óxidos de hierro como goetita $FeOOH$ y hematita Fe_2O_3 . Se corroboró que no es termodinámicamente factible la formación de minerales que contengan boro, a menos que sean reacciones de sorción sobre hidróxidos de hierro o aluminio. En la sección Anexos se presenta el detalle de las fases sólidas que son factibles de precipitar o disolver en el río Azufre.



Figura 29. Formación de minerales en las orillas del río Azufre en el sector bocatoma canal Azufre.



Figura 30. Formación de minerales en las orillas del río Azufre en el sector bocatoma canal Azufre.



Figura 31. Junta Caracarani con Colpitas, aguas arriba de Lluta en Alcérreca.



Figura 32. Junta Caracarani con Colpitas, aguas arriba de Lluta en Alcérreca.

Se observa claramente en la imagen inferior, Figura 32, que la mezcla no ocurre inmediatamente. Sin embargo, unos 200 m abajo de la junta, se produce la mezcla en una curva antes de la estación de Lluta en Alcérreca. En esta junta se observan procesos de precipitación de componentes disueltos, principalmente óxidos de aluminio y óxidos de fierro, que se reflejan en recubrimientos de rocas y como capas de óxidos de fierro en zonas quietas.



Figura 33. Costras salinas en el sector de Caracarani.



Figura 34. Costras salinas en el sector de Colpitas y borateras.

Las zonas con aguas con alto contenido de sales tienen asociadas áreas de evaporación recubiertas con costras salinas, potenciadas por la alta evaporación que ocurre en la cuenca. La Figura 33 muestra costras salinas en el nacimiento de Caracarani, aguas abajo Laguna Blanca. Esta costra contiene del orden de 1 mg de boro soluble por gramo de costra, lo que implica que menos de un 1% en peso correspondería a $B(OH)_3$. La imagen inferior, Figura 34, muestra costras salinas en el sector del río Colpitas. Las dimensiones del libro son aproximadamente 20x15 cm. Esta costra contiene del orden de 65 mg de boro soluble por gramo de costra, lo que implica que un 6,5% en peso correspondería a $B(OH)_3$. Cerca de las borateras este valor se duplica. Durante las tormentas parte de esta costra se disuelve y sus contenidos son aportados a la infiltración y escorrentía superficial.

Para considerar el efecto de la concentración de sales debido a la evaporación, se modeló en PHREEQC la saturación de minerales en el río Colpitas simulando una evaporación de un 99% en condiciones de equilibrio. Para conocer la situación base, se modeló la especiación del río dadas las condiciones vistas en terreno y los análisis obtenidos en laboratorio. Así, los minerales factibles de precipitar serían principalmente aluminosilicatos y silicatos como clinoptilolita sódica $Na_{3,467}Al_{3,45}Fe_{0,017}Si_{14,533}O_{36} \cdot 10,922H_2O$ y montmorillonita cálcica $Ca_{0,165}Mg_{0,33}Al_{1,67}Si_4O_{10}(OH)_2$, junto con otros minerales más comunes como dolomita $CaMg(CO_3)_2$ y kaolonita $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Las especies predominantes en estas condiciones

son Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} y B(OH)_3 . Al simular la evaporación, se suman otros sólidos como hidróxidos de hierro Fe(OH)_3 y de manganeso como pirulosa MnO_2 y manganita MnO(OH) . En este caso, las especies disueltas predominantes son las mismas que en la condición inicial.

Se modeló también la especiación de agua de boratera. En la condición inicial los minerales factibles de precipitar son principalmente silicatos como cuarzo SiO_2 y algunos minerales de hierro, mientras que las especies disueltas son principalmente B(OH)_3 , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^+ . En el punto 8.4.2 se simula la precipitación de minerales boratados en dicha fuente de agua en el contexto de las medidas de mitigación examinadas.

En la sección de Anexos se presentan el detalle de las fases que precipitan o se disuelven para cada caso, con su correspondiente índice de saturación. Esta modelación da evidencia de la influencia de la evaporación en la especiación de los minerales en el caso del río Colpitas y su principal fuente de contaminación que son las borateras.

Procesos de concentración y dilución

Los procesos de concentración están determinados principalmente por la evaporación y la evapotranspiración asociada a la vegetación natural (parte alta del Valle) y a la agricultura (parte baja del Valle). Los procesos de dilución están asociados a la mezcla con aguas de menor conductividad tales como la escorrentía debido a precipitaciones durante el Invierno Boliviano, y/o la contribución desde acuíferos recargados con agua de menor conductividad. En menor proporción, puede haber disminuciones menores de conductividad por procesos de precipitación química, aunque debido a la solubilidad de los iones principales (cloruro, sulfato, y sodio) esta disminución es muy menor.

i) Conductividad e iones principales

Para evaluar los procesos de concentración disolución primero se presenta una descripción del comportamiento de los iones principales y la conductividad a lo largo del río Lluta, desde Lluta en Alcérreca hasta Lluta en Panamericana.

Desde la Figura 35 a la Figura 38 se presentan diagramas de Stiff que grafican los cationes (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) principales a lo largo del Lluta. En estos gráficos las concentraciones están expresadas como meq/L de carga, de modo que permite comparar sus magnitudes sobre una base común. Estas aguas son básicamente del tipo Na-Cl- SO_4 , característica que no cambia en todo el tramo analizado, teniendo una contribución relativa menor de bicarbonato en relación a los otros iones. Esto sugiere que no hay contribuciones relevantes de aguas de distintas calidades a lo largo de estos tramos, ya que la forma de los diagramas permanece constante. El tamaño de los gráficos, asociado a su área, está asociado a la concentración de los iones: áreas más grandes indican aguas con mayor concentración. El aumento del área preservando la forma del gráfico sugiere que las variaciones se deben a concentración de la solución a medida que se avanza hacia aguas abajo. La Figura 35 muestra que durante diciembre del 2007 la estación Lluta en Panamericana presentó un aumento considerable en los iones principales en comparación con las concentraciones reportadas aguas arriba. En el caso de la Campaña 3, se registró una tendencia similar. Los puntos de medición muestran un sutil pero definido aumento hacia aguas abajo, de izquierda a derecha en la Figura 36. Debido a estos antecedentes, la

última campaña realizada (Campaña 4) consideró el análisis de más puntos en la zona baja del Lluta para validar la tendencia presentada en las campañas anteriores. La Figura 38 corrobora la tendencia presentada en la Figura 35. Lluta en Panamericana resulta ser la estación con mayor concentración de iones en el Lluta bajo. Cabe destacar la similitud de los valores presentados para diciembre 2007 y abril 2008.

Una forma equivalente de visualizar la información discutida anteriormente es a través de los diagramas de Piper. Los diagramas de Piper grafican la composición del agua de acuerdo a categorías definidas de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) y aniones (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}). Los diagramas de Piper de la Figura 35 evidencian una composición química similar para todas las muestras graficadas, sugiriendo que los cambios en la conductividad se deben a una evaporación uniforme de la solución. La Figura 39 indica además que las mediciones de iones reportadas por este estudio son consistentes con las presentadas por la DGA.

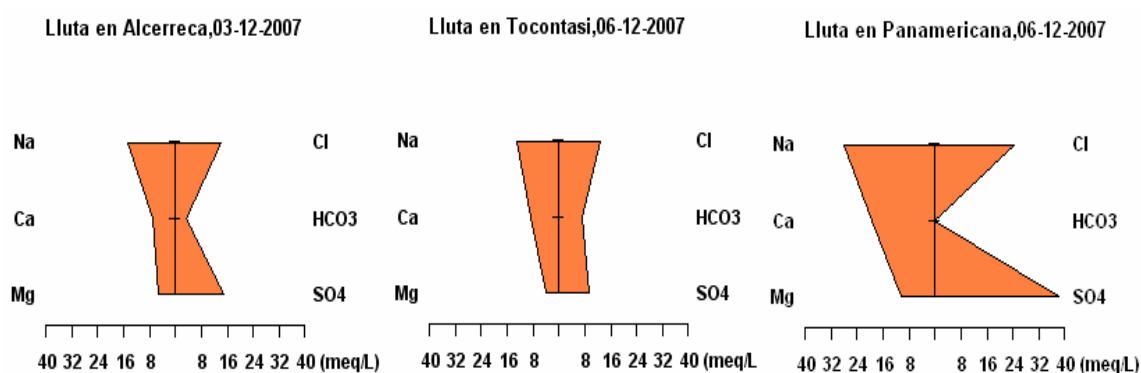


Figura 35. Diagramas Stiff, Campaña 1, Lluta bajo.

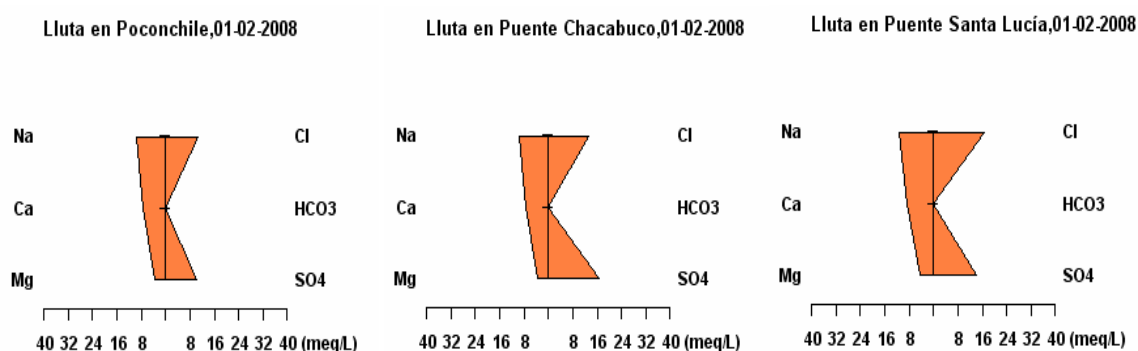


Figura 36. Diagramas Stiff, Campaña 3, Lluta bajo.

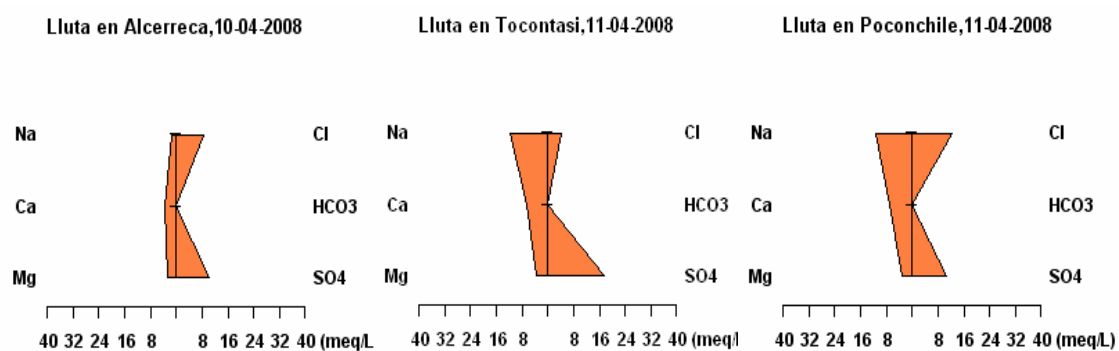


Figura 37. Diagramas Stiff, Campaña 4, Lluta bajo.

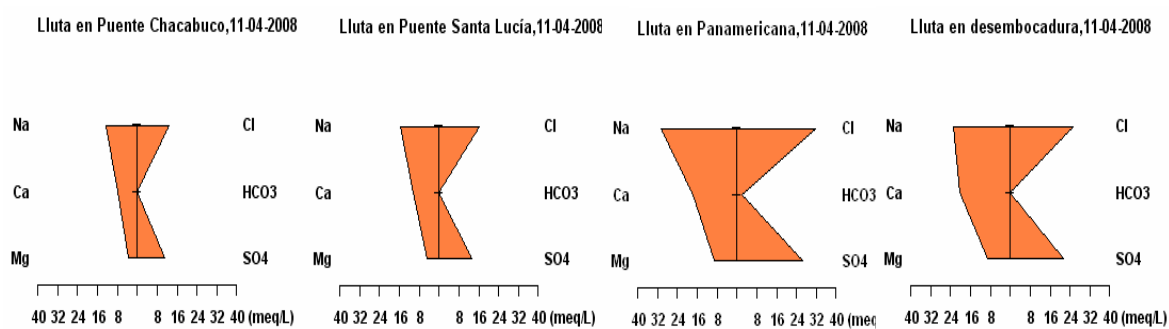
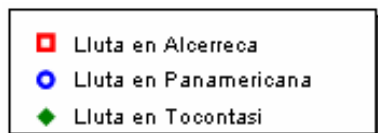
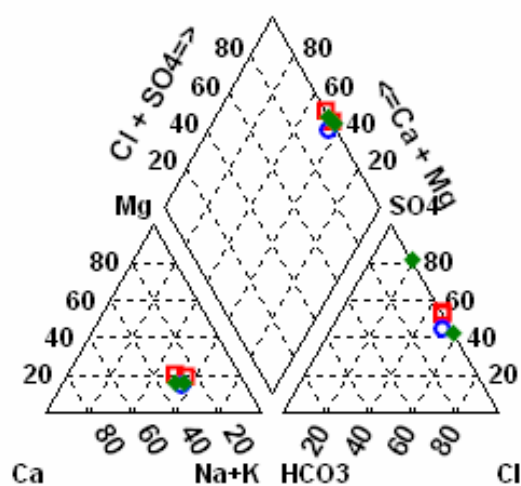


Figura 38. Diagramas Stiff, Campaña 4, Lluta bajo, continuación.

Iones Principales_Lluta bajo_DICTUC



Iones Principales_Lluta bajo_DGA

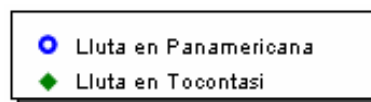
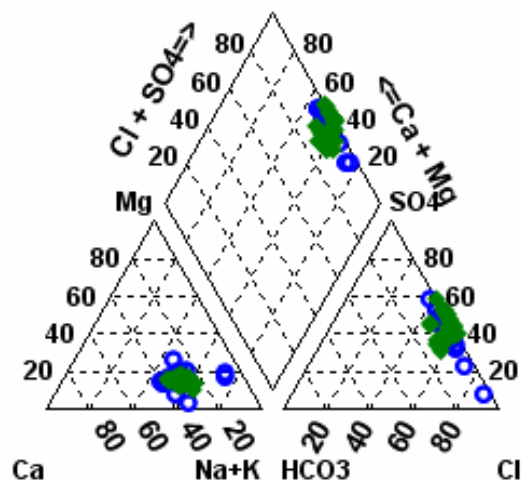


Figura 39. Diagramas de Piper para las principales estaciones de monitoreo del río Lluta, mediciones de este estudio (izquierda) y datos históricos de la DGA (derecha).

La Figura 40 presenta la dispersión en las mediciones de sulfato reportadas por la DGA en sus estaciones de monitoreo de calidad.

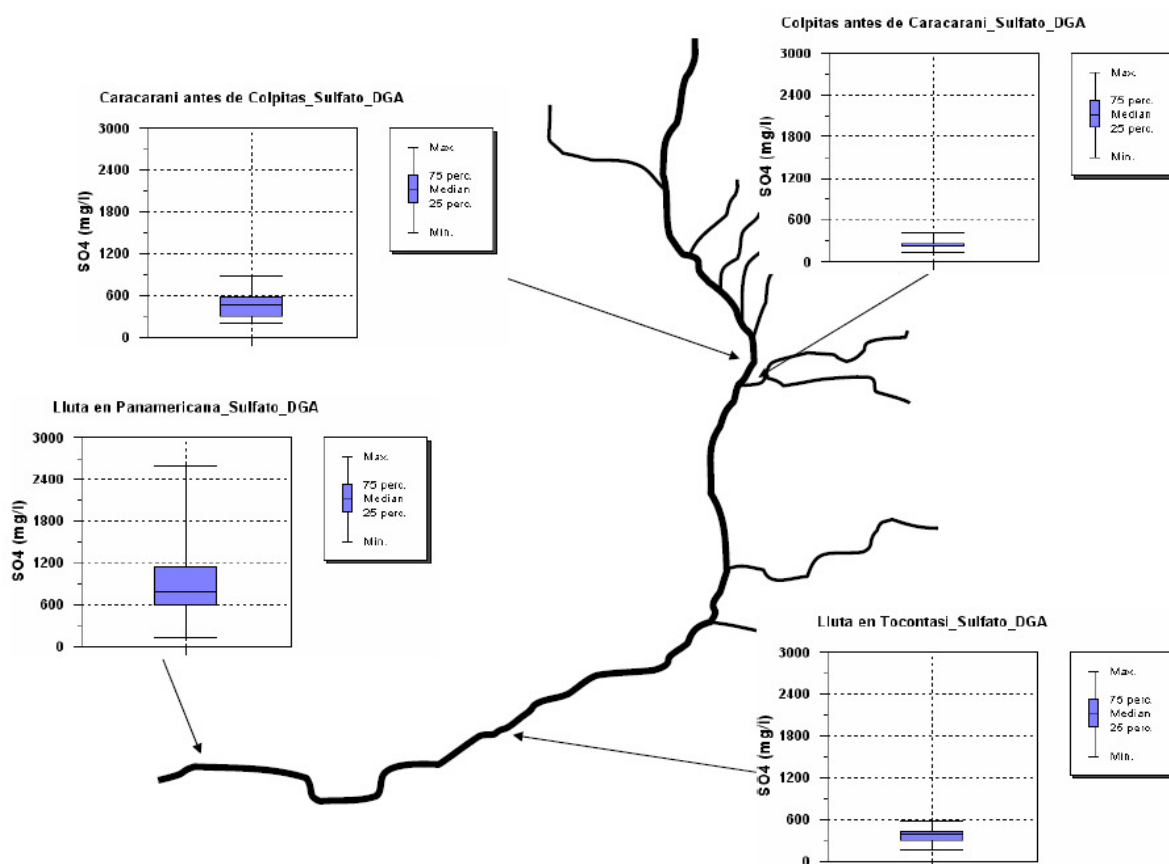


Figura 40. Datos históricos de la DGA para la concentración de sulfato.

Se puede apreciar que los datos históricos de la concentración de sulfato de la DGA para la estación Caracarani antes de Colpitas muestran un cierto grado de variabilidad. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 560 y 768 mg/L (Figura 41), dentro del rango reportado por la DGA. Sin embargo, en Colpitas antes de Caracarani las mediciones de este estudio estuvieron en torno a los 230 mg/L. Las mediciones de la DGA muestran una baja dispersión y ausencia de máximos que se alejen de la tendencia general. Para la estación Lluta en Tocontasi las mediciones de este estudio fluctuaron entre 406 y 840 mg/L. Los registros históricos de la DGA son más bien constantes, sin ningún *peak* considerable. Por último en Lluta en Panamericana las concentraciones reportadas por la DGA presentan una variabilidad considerable. Las mediciones de sulfato para este punto oscilan entre 714 y 1.820 mg/L. El máximo de 2.598 mg/L coincide con la fecha de reporte del máximo de cloruro (27-9-98), lo que validaría la hipótesis de un posible fenómeno de concentración en la parte más baja del río.

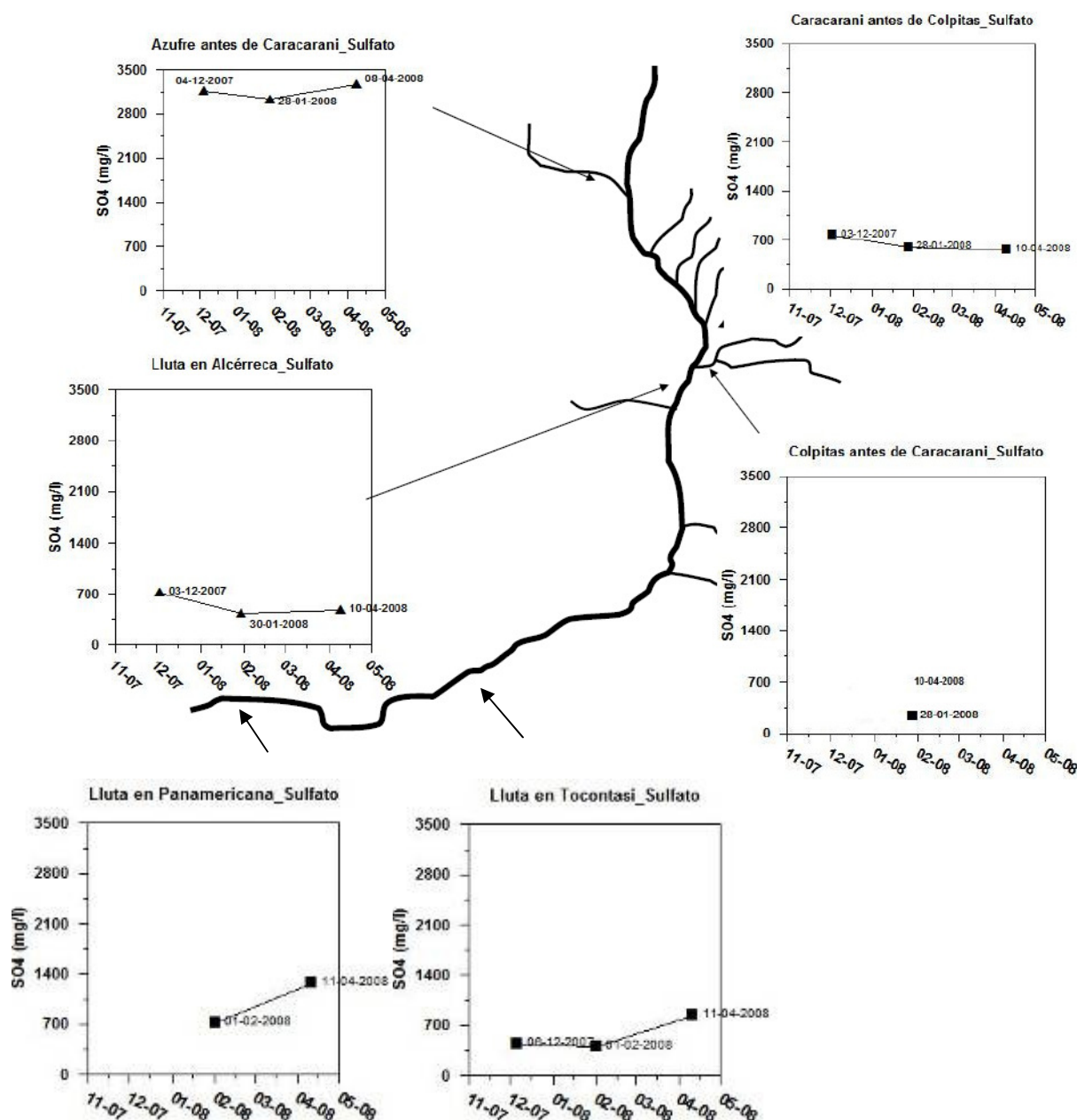


Figura 41. Mediciones de sulfato reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

La Figura 41 presenta las mediciones de sulfato reportadas en este estudio, distribuidas espacialmente en la cuenca. Destaca las elevadas concentraciones del río Azufre, siendo el Colpitas el que presenta las menores.

Las variaciones de la concentración de cloruro reportadas por la DGA se presentan en la Figura 42. La Figura 42 presenta los reportes históricos que muestran la estabilidad de la concentración de cloruro en Caracarani antes de Colpitas. Las mediciones de este estudio oscilaron entre 242 y 301 mg/L (Figura 43), siendo consistentes con lo reportado por la DGA. Por otro lado, la variabilidad histórica en la estación Colpitas antes de Caracarani se atribuye a la presencia de costras salinas en la zona de borateras, las cuales probablemente

se disuelven y desembocan finalmente al río Colpitas en época de precipitaciones. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 577 y 1.043 mg/L. En Lluta en Tocontasi las mediciones de la DGA son estables y no se reportan *peaks* puntuales. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 140 y 444 mg/L. En Lluta en Panamericana las mediciones de la DGA muestran que en esta estación la concentración de cloruro presenta una oscilación mayor que en los otros puntos. El máximo de 3.575 mg/L está asociado a un caudal de 20 L/s (27-9-98), bastante bajo para lo que normalmente escurre en esta estación (500 a 1.000 L/s), por lo que presumiblemente la evaporación y/o infiltración de cauce provocaron la concentración de este ión en el cauce. Las mediciones de este estudio oscilaron entre 616 y 1.123 mg/L (Figura 43), dentro del rango de dispersión de las concentraciones históricas. Debe tenerse presente también que la descarga de Desalari puede aumentar la concentración de sales disueltas en la estación Lluta en Panamericana.

La Figura 43 muestra las mediciones de cloruro reportadas por el equipo consultor. A pesar de las diferencias entre el río Azufre y el resto de los cursos, todas se encuentran dentro del mismo orden de magnitud. A diferencia de lo que ocurre con el sulfato, el cual tiene una presencia menos marcada en el río Colpitas debido a que los mayores aportes provienen del Azufre, el cloruro tiene una distribución más homogénea en la cuenca.

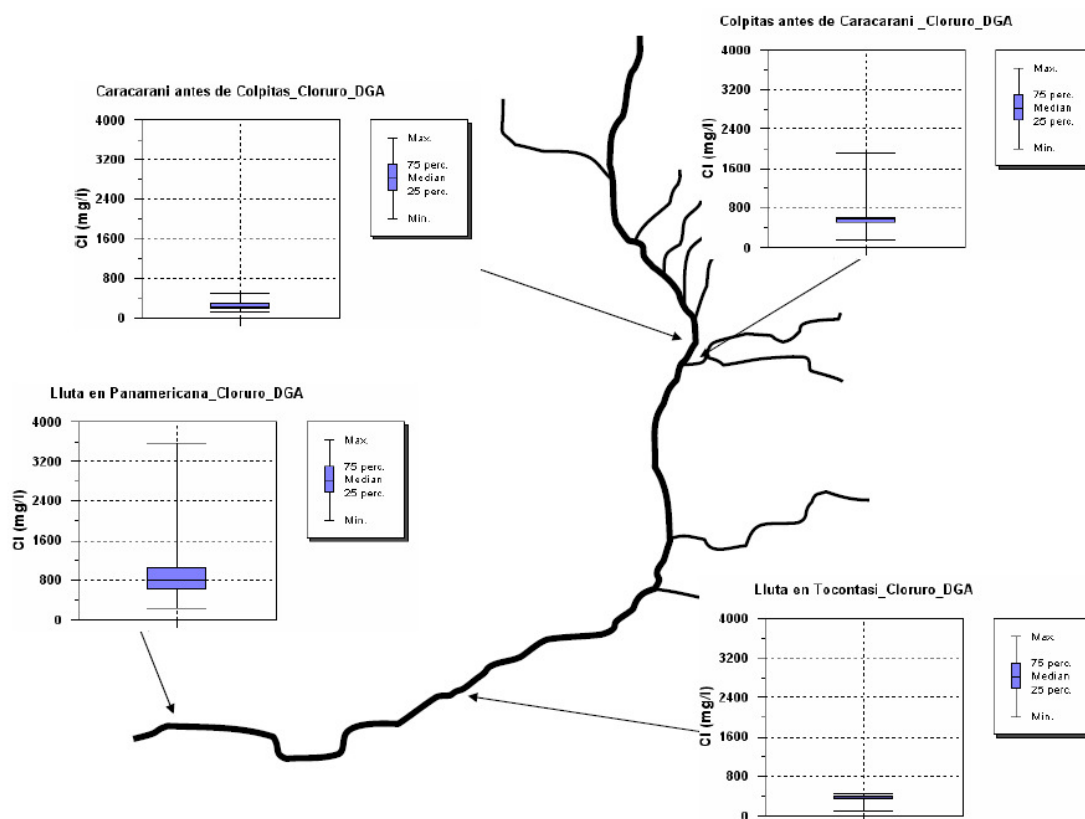


Figura 42. Datos históricos de la DGA para la concentración de cloruro.

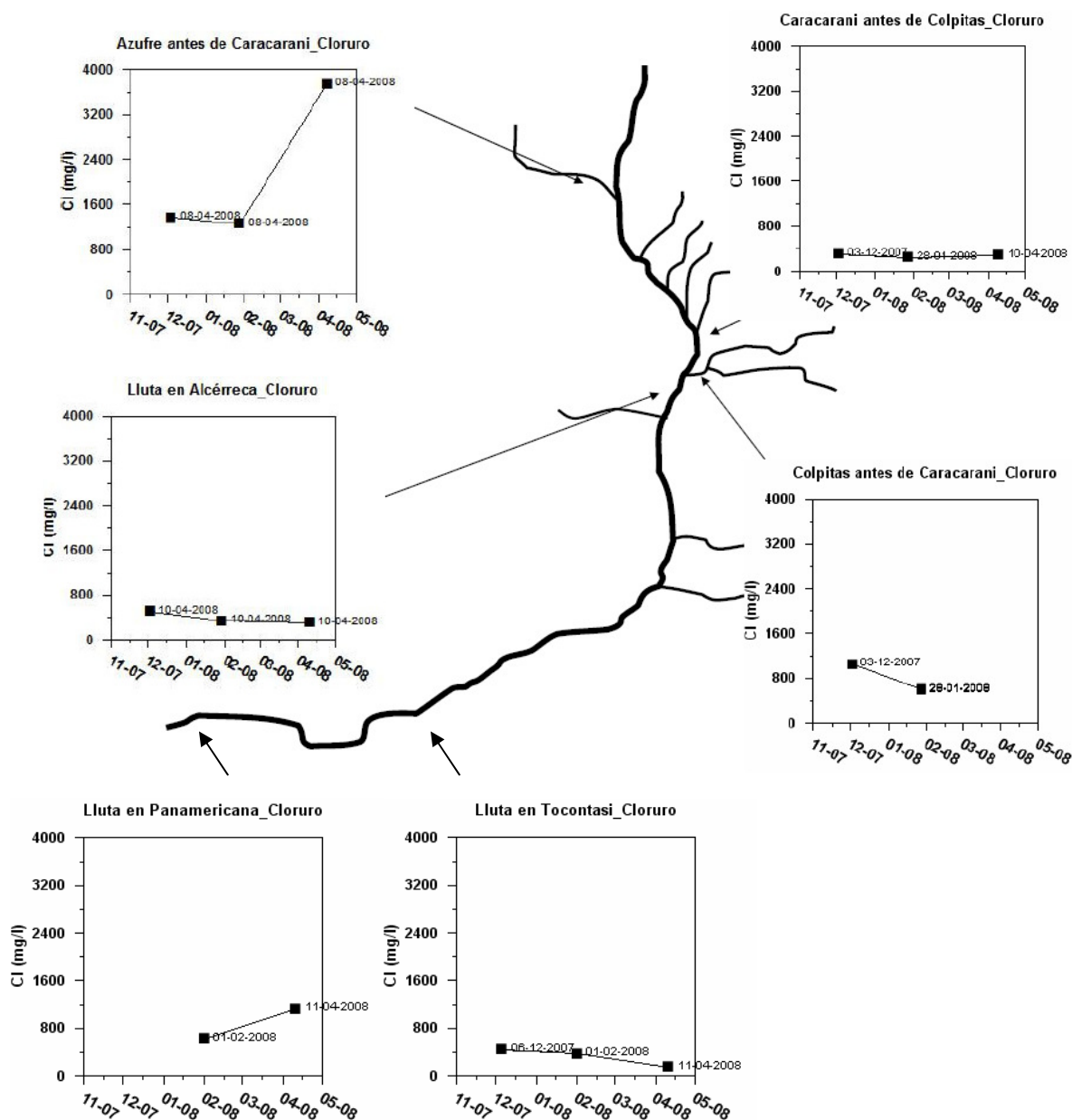


Figura 43. Mediciones de cloruro reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

La Figura 44 muestra la variación espacial de la conductividad a lo largo de la cuenca del Lluta. Las mediciones puntuales realizadas por el equipo consultor para los principales cursos se presentan en series de tiempo, como lo muestra la Figura 45. La Figura 44 permite apreciar que en Caracarani antes de Colpitas la conductividad histórica presenta poca variación. Los valores reportados por este estudio fluctuaron entre 1,3 y 2,14 mS. La situación es similar para Colpitas antes de Caracarani, donde la conductividad ha sido poco variable. Los valores reportados por este estudio fluctuaron entre 2,5 y 2,9 mS (Figura 45). Mientras, para la estación Lluta en Tocontasi la DGA ha reportado que la conductividad es bastante estable. Las mediciones del equipo consultor fluctuaron entre 1,4 y 2,3 mS. Distinto es el caso de la estación Lluta en Panamericana, ya que es la que reporta mayor variación histórica. Las mediciones de este estudio fluctuaron entre 3,15 y 5,47 mS y la

DGA ha reportado una variabilidad similar. Los valores de conductividad tanto históricos como los realizados por el equipo consultor (Figura 44 y Figura 45) son altos para todas las estaciones de monitoreo, indicando que naturalmente los cursos de agua tienen un alto contenido de sales, aportadas principalmente por el río Azufre (incluso se presenta en una escala mayor para resaltar su salinidad) y las borateras de la Quebrada Colpitas.

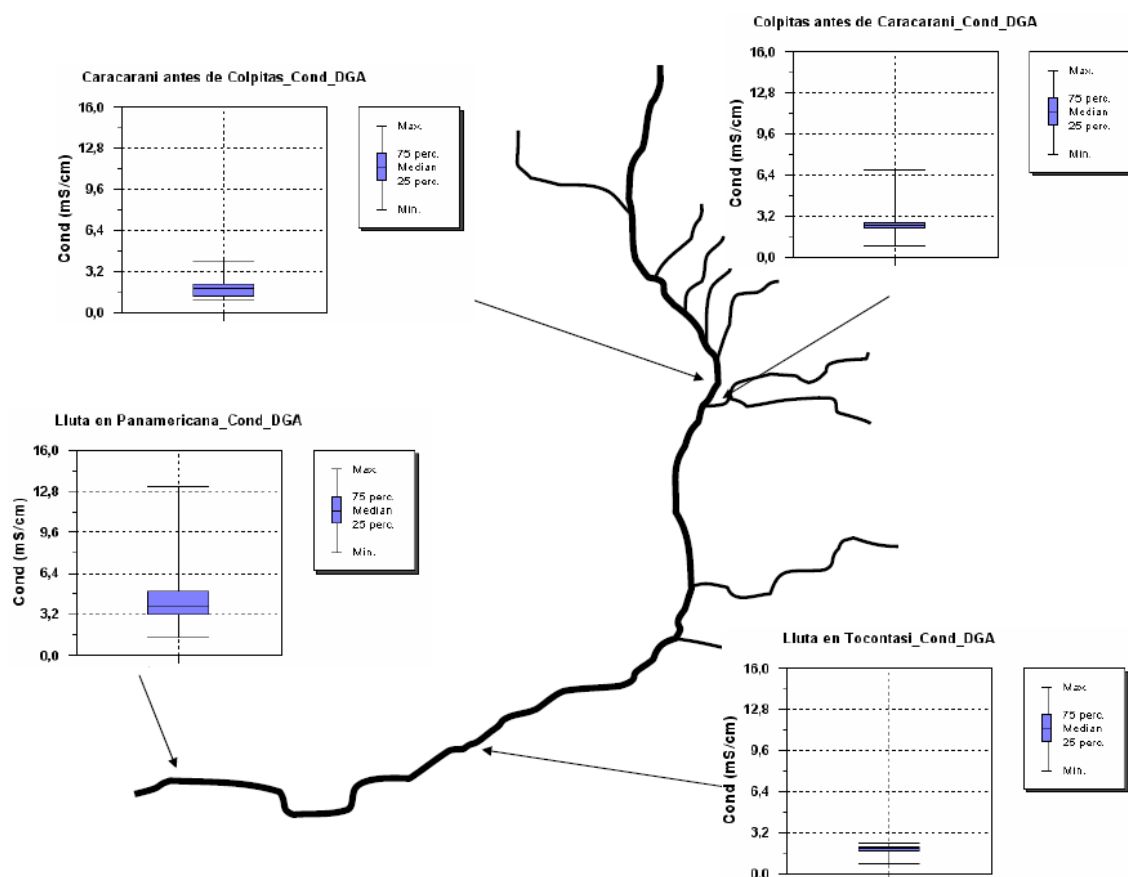


Figura 44. Datos históricos de la DGA para la conductividad.

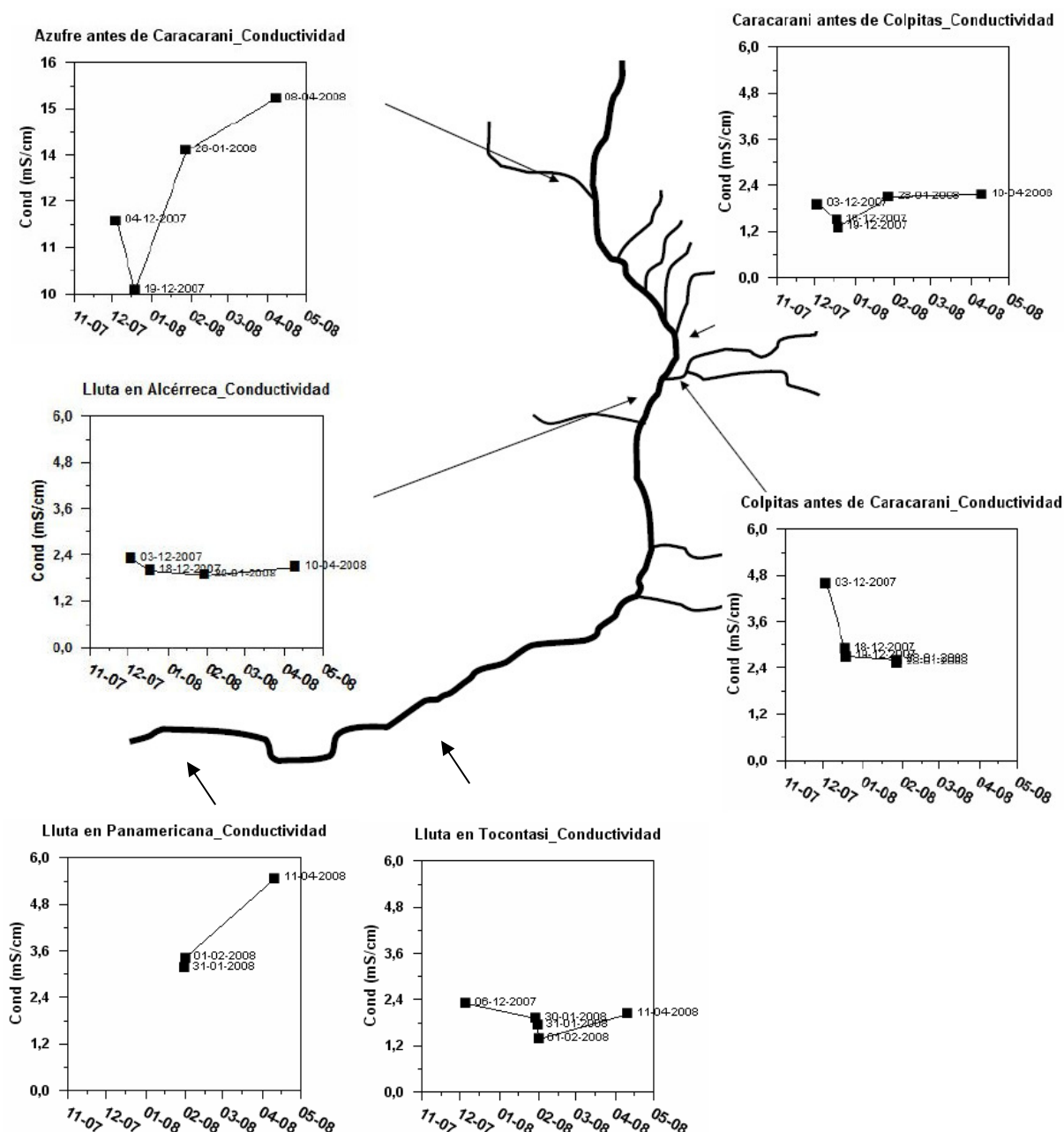


Figura 45. Mediciones de conductividad reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

La Figura 46 muestra la variabilidad histórica de las concentraciones de sodio medidas en las estaciones de monitoreo de la DGA. Puede verse que la mayor variabilidad se encuentra en la estación Lluta en Panamericana, donde además se reportó el máximo medido de 1.954 mg/L Na. Mientras, Lluta en Tocontasi presenta la menor oscilación, registrándose un mínimo de 76 mg/L Na y un máximo de 271 mg/L Na.

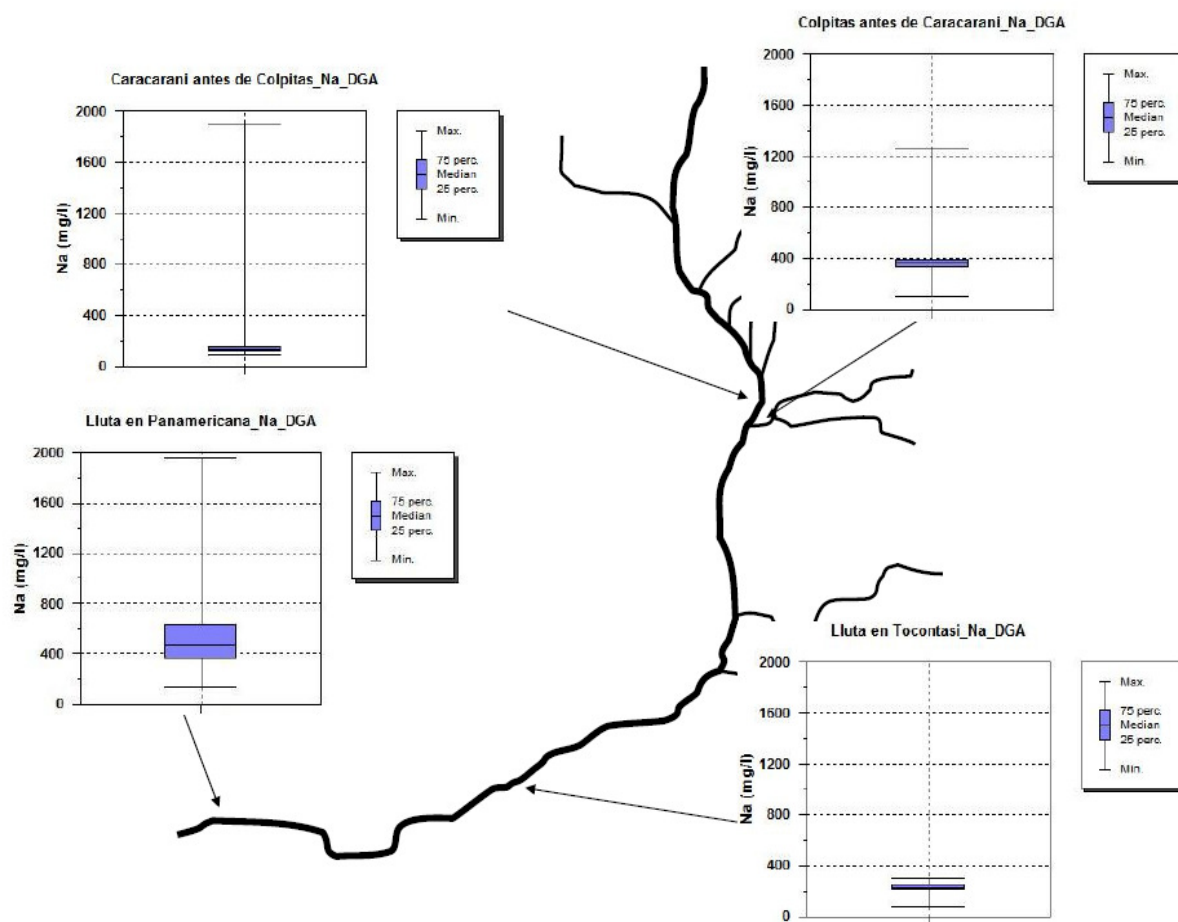


Figura 46. Datos históricos de la DGA para la concentración de sodio.

La Figura 47 presenta las mediciones de sodio reportadas por el equipo consultor para los cursos principales. Los valores se encuentran dentro del rango de las mediciones de la DGA. Consistentemente con las mediciones de conductividad y los otros iones, los cursos con mayores concentraciones de sodio son el río Azufre, el río Colpitas y Lluta en Panamericana.

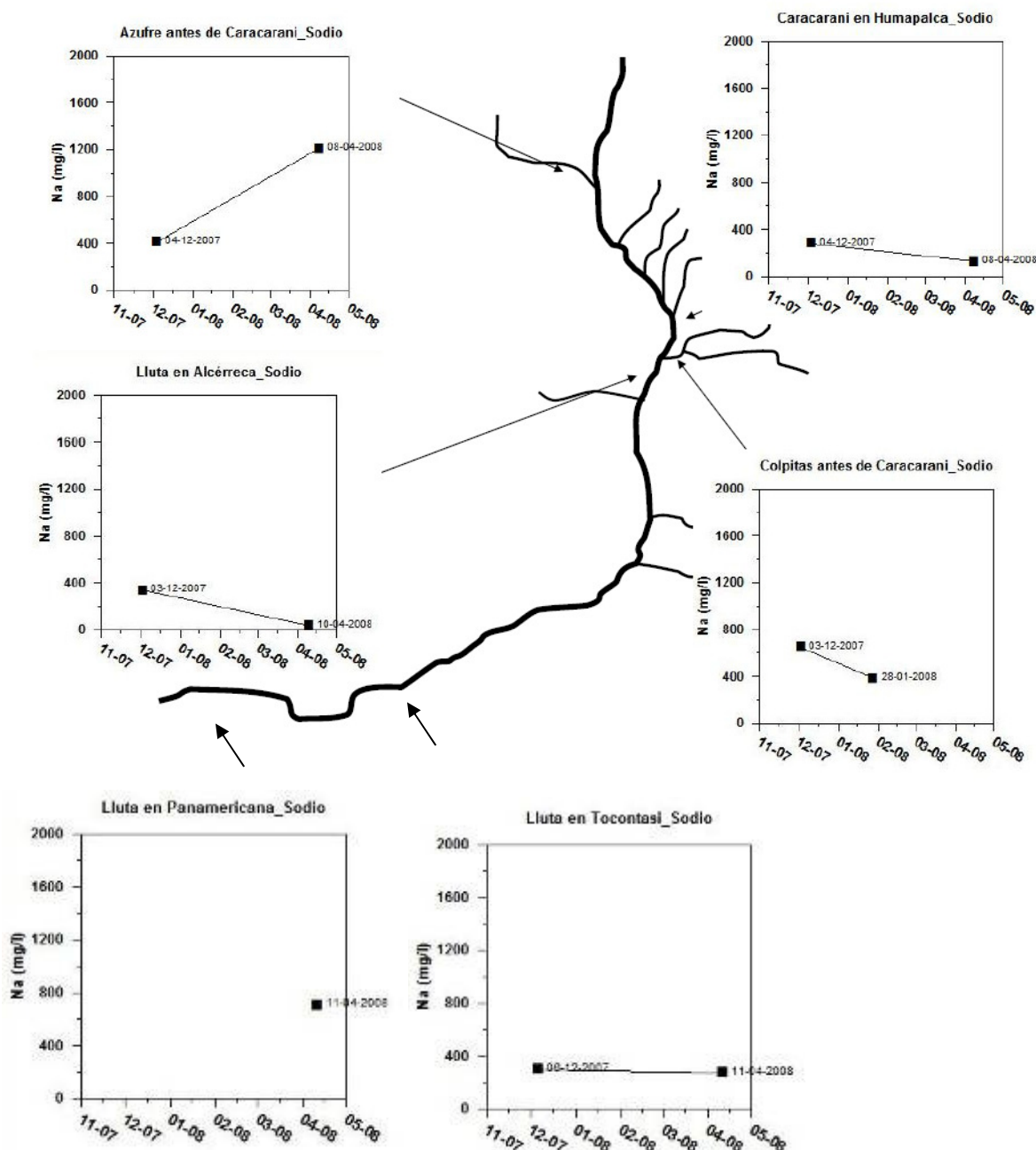


Figura 47. Mediciones de sodio reportadas por este estudio, cursos de regular y mala calidad.

ii) Concentración por evapotranspiración en sector agrícola

El proceso de concentración que se observa en los resultados de los iones probablemente está asociado a la evaporación y a la evapotranspiración asociada a los cultivos existentes aguas abajo de Lluta en Vinto. Un proceso de concentración similar puede ocurrir en los sectores de Socoroma y Putre, pero que no está evidenciado por la poca información disponible.

Desde el sector Vinto hasta Lluta en Desembocadura existen cultivos regados por una red de canales que provienen del Lluta (Figura 48 y Figura 49). Dependiendo del nivel de tecnificación del riego, distintas proporciones del agua usada para riego son infiltradas, mientras que otras pueden escurrir superficialmente, y la fracción remanente es evaporada (desde el suelo o superficies vegetales) o usada por la planta para crecimiento. Dado que el proceso de evaporación incluye el agua y no las sales disueltas, se produce una acumulación de sales en el suelo, o bien un escurrimiento de soluciones más concentradas que aguas abajo contribuyen al cauce principal.



Figura 48. Cultivos en el valle del Lluta, sector Arancha.



Figura 49. Cultivos en el valle del Lluta, sector Vinto.

El proceso anterior se ve ilustrado en la Figura 50. Esta figura muestra cómo varía la conductividad medida en las campañas en terreno. La conductividad aumenta hacia aguas abajo, alcanzando el máximo en Lluta en Panamericana. Desde a aguas abajo, los números de las flechas corresponden a los puntos Lluta en Poconchile (1), Lluta en Puente Chacabuco (2), Lluta en Puente Santa Lucía (3), finalizando en Lluta en Panamericana (4). Se observa que la conductividad permanece relativamente constante entre Alcérreca y

Tocontasi, mientras que aumenta de una forma casi lineal con la distancia, a una tasa aproximada de $50 \mu\text{S}/\text{cm}/\text{km}$ aguas abajo de Lluta en Tocontasi. El último punto en el caso de las mediciones de febrero (Campaña 3) corresponde a Lluta en Panamericana, mientras que para las de abril (Campaña 4) se reporta el valor medido en el río Lluta en la desembocadura.

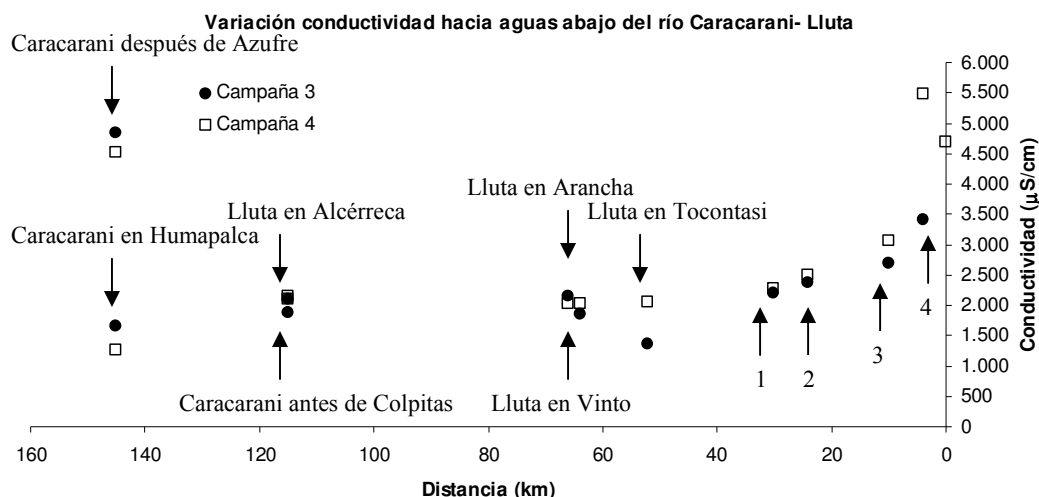


Figura 50. Conductividad medida en el río Caracarani-Lluta en función de la distancia de la medición a la Desembocadura del río Lluta, enero y abril 2008. Desde aguas arriba a aguas abajo, los números de las flechas corresponden a los puntos Lluta en Poconchile (1), Lluta en Puente Chacabuco (2), Lluta en Puente Santa Lucía (3) y Lluta en Panamericana (4).

La Figura 51 presenta los valores medidos durante la primera campaña, considerando como kilómetro cero la Desembocadura del río Lluta.

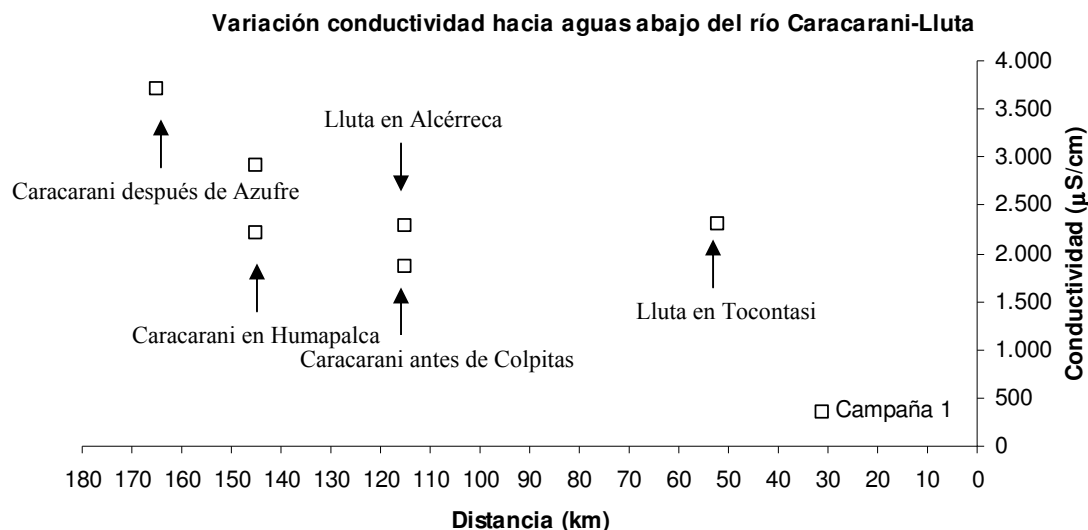


Figura 51. Conductividad medida en el río Caracarani-Lluta en función de la distancia de la medición a la Desembocadura del río Lluta, diciembre 2007.

iii) Dilución por tormentas durante el Invierno Boliviano

Al analizar los datos de precipitaciones y su relación con las mediciones de conductividad reportados para la estación Lluta en Alcérreca no se observa una tendencia clara. Debido a ésto, no se puede definir certeramente la influencia de las precipitaciones en la salinidad del río Lluta, ya que no siempre su presencia disminuye los valores de la conductividad como se pensaría preliminarmente debido al efecto de dilución causado por el aumento en la cantidad de agua. En el caso particular de la Figura 52, que grafica las mediciones de la DGA de los valores medios diarios de conductividad y precipitación de enero y febrero 2002 en Lluta en Alcérreca, al cuantificar los cambios en la conductividad ocasionados por las lluvias, los valores variaron desde un aumento de 300% en la precipitación diaria sin que causara efectos considerables en la conductividad, hasta un 94% de disminución de la conductividad sin que se haya reportado un aumento en la precipitación media diaria. En otras palabras, no se observa una relación clara causa-efecto entre la precipitación/caudal y la conductividad. Esto se puede deber tanto a la complejidad de las interacciones como a la poca confiabilidad de los sensores instalados por largos periodos de tiempo. En el registro de conductividades se pueden observar saltos discretos asociados a cambios en el sensor más que a cambios en la variable medida.

La Figura 52 muestra que en enero 2002, a medida que aumentan las precipitaciones, la conductividad disminuye producto de la dilución de las aguas del río Lluta. Sin embargo, durante febrero se observó el fenómeno inverso: la conductividad comienza a aumentar antes que se produzcan las precipitaciones, lo cual podría considerarse como una recuperación de la condición de salinidad natural del cauce luego de período de lluvia y crecida. Luego, se presentan precipitaciones, aumentando tanto el caudal como la conductividad.

Los antecedentes recopilados en este estudio permiten suponer la existencia de fenómenos complejos que expliquen que las precipitaciones causen aumentos en la conductividad, como la solubilización de costras salinas y/o minerales ubicadas en los alrededores que son

arrastradas por las lluvias, desembocando finalmente en los cursos de agua. Además, en la zona de las borateras de la Quebrada Colpitas, donde los afloramientos poseen conductividades del orden de 30 mS/cm, probablemente el aporte natural de esta zona al río Colpitas se vea aumentado por la escorrentía, aumentando así al mismo tiempo la cantidad de sales y el agua en el río Colpitas y por tanto en el Lluta. Asimismo, debe tenerse en cuenta que estas precipitaciones pueden tener una alta variabilidad espacial.

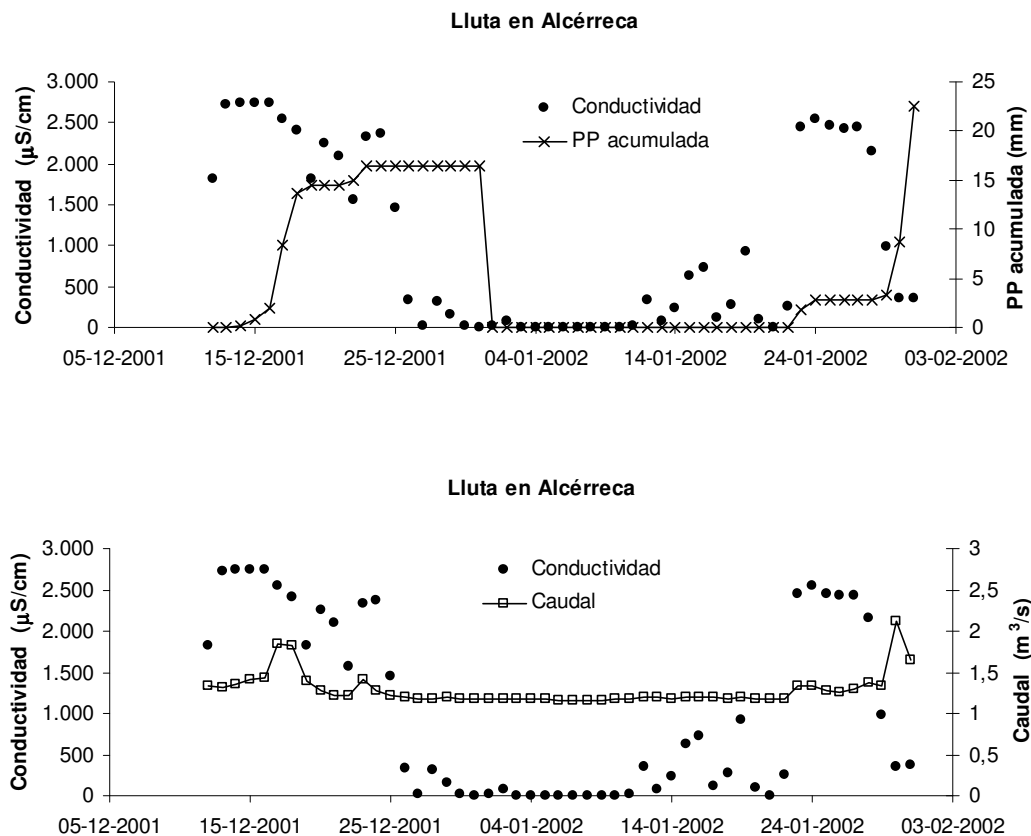


Figura 52. Precipitación, caudal y conductividad media diaria, enero y febrero 2002, estación Lluta en Alcérreca.

En la Figura 52 puede apreciarse que a pesar de las precipitaciones de fines de diciembre de 2001, el caudal reportado prácticamente no tuvo variación a pesar de la notable disminución de la conductividad. Al mirar un rango más amplio de tiempo, se aprecia que hay aumentos y disminuciones en la conductividad sin que se hayan reportado precipitaciones ni variaciones en el caudal, como se ve en el gráfico inferior de la Figura 52.

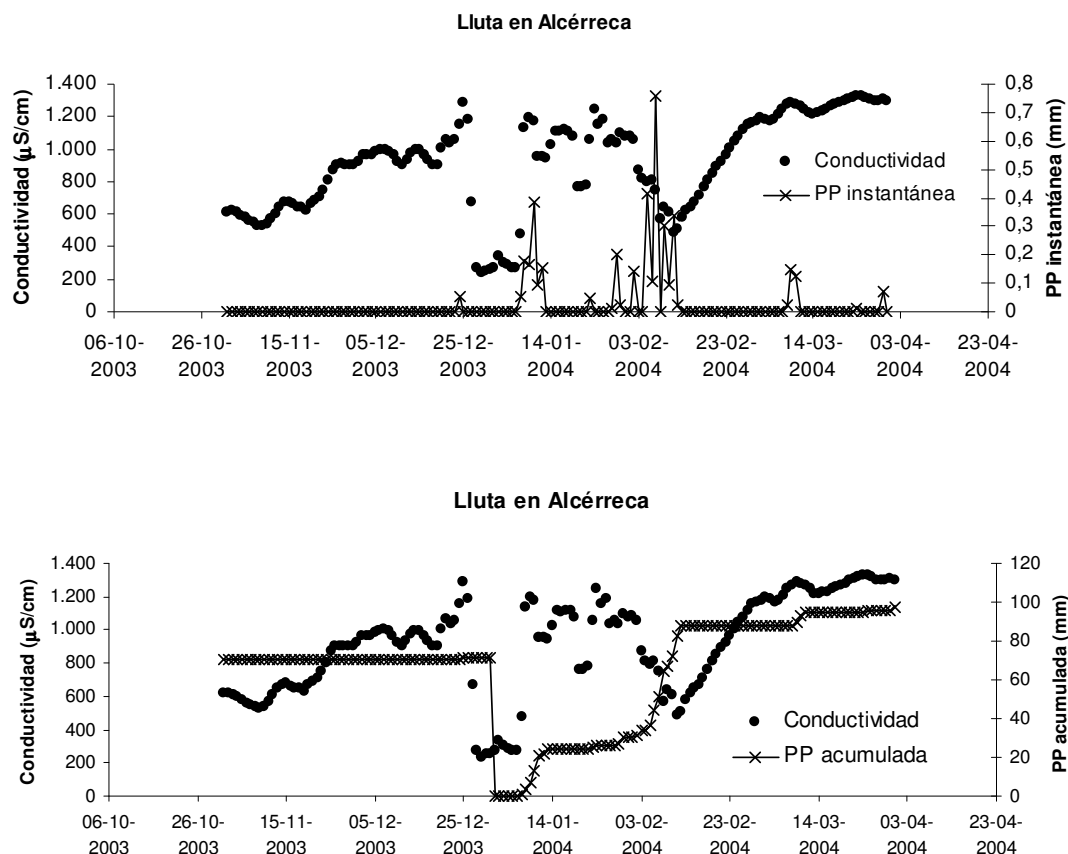


Figura 53. Precipitación y conductividad media diaria, noviembre 2003 a marzo 2004, estación Lluta en Alcérreca.

La Figura 53 y la Figura 54 presentan las precipitaciones y conductividades reportadas en Lluta en Alcérreca para un período de tiempo posterior, entre noviembre 2003 y marzo 2005.

A fines del 2003, la Figura 53 muestra que no llovió mientras la conductividad aumentaba progresivamente. Luego, su marcado descenso a fines de diciembre tampoco fue causado por las lluvias. Las precipitaciones aparecen una vez que la conductividad retoma los valores previos a la baja (enero 2004), y luego como lo muestra la Figura 53, eventualmente serían la causa de la disminución sostenida ocurrida en febrero 2004. A continuación, la conductividad vuelve a aumentar gradualmente, sin una marcada presencia de precipitaciones; sólo un evento puntual a principios de marzo 2004 que no tuvo mayor influencia.

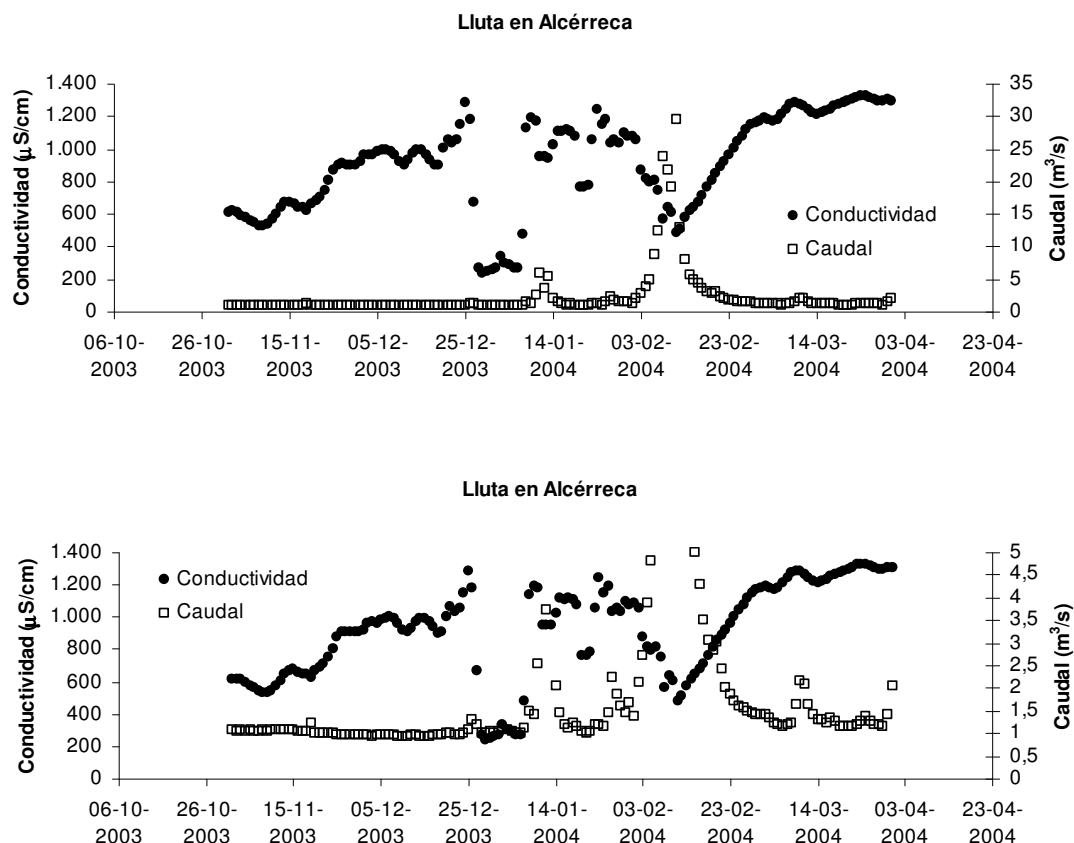


Figura 54. Caudal y conductividad media diaria, noviembre 2003 a marzo 2004, estación Lluta en Alcérreca.

Como lo muestra la Figura 54, la variación de la conductividad no presenta una tendencia clara según varía el caudal. Se distinguen 3 tendencias principales:

- Aumento sostenido de la conductividad, desde fines de octubre del 2003 hasta fines de diciembre 2003, sin un aumento de las precipitaciones ni del caudal respectivo.
- Disminución brusca de la conductividad (fines de diciembre-principios de enero 2004) sin aumento del caudal, seguida por un rápido recuperación a la situación previa, presentándose luego oscilaciones sin una tendencia clara.
- Disminución marcada de la conductividad, cuyo mínimo coincide con el máximo de la precipitación acumulada (Figura 53), y con el caudal máximo (Figura 54) en febrero del 2004.
- Aumento sostenido de la conductividad a medida que disminuye el caudal luego del *peak*.

Estos antecedentes deben considerarse en cuanto a estimar posibles efectos de la calidad del agua ante fenómenos meteorológicos. Si bien lo que debería ocurrir normalmente es que las lluvias contribuyan disminuyendo la concentración de sales diluyendo el cauce, esto depende de la calidad de las aguas aportantes.

Para verificar posibles tendencias temporales de rango horario, en la campaña de enero de 2008 se realizó un monitoreo de conductividad, pH y temperatura durante 45 horas aproximadamente (con 2 recesos nocturnos) con mediciones cada 2 horas, con el fin de apreciar posibles variaciones horarias. Durante el período de monitoreo no se registraron precipitaciones ni otros fenómenos meteorológicos en el sector de Alcérreca, pero sí se registraron tormentas en las cercanías.

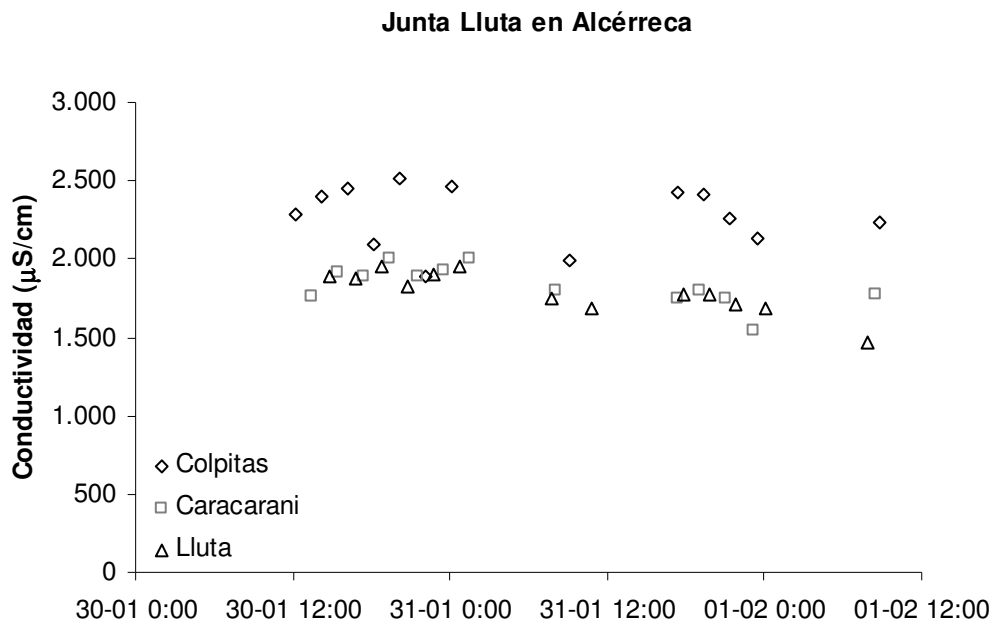


Figura 55. Variación horaria de la conductividad, junta Lluta en Alcérreca.

La Figura 55 muestra en conjunto las conductividades reportadas para los ríos Colpitas antes de Caracarani, Caracarani antes de Colpitas y Lluta en Alcérreca. A pesar que las mediciones para los tres cauces se realizaron en horas similares pero no exactamente iguales se aprecia una cierta correlación en las mediciones. Destacan los altos valores de Colpitas que siempre se encuentran sobre Caracarani y Lluta, atribuidos a los aportes de los afluentes hidrotermales -identificados como borateras- ubicados en la zona oriente de la Quebrada de Colpitas, con conductividades del orden de 33 mS.

La Figura 56 permite apreciar el efecto de la temperatura en las mediciones de conductividad reportadas. En general, un aumento de la conductividad va acompañado de un aumento de la temperatura y viceversa. Las temperaturas reportadas para los tres cursos de agua en el gráfico inferior izquierdo varían normalmente según la hora del día: el máximo valor se alcanza alrededor del mediodía, y luego disminuye a medida que termina el día. Estas mediciones dan evidencia de la importancia de los fenómenos de concentración y evaporación en cuanto a la presencia de sales en la zona alta de la cuenca.

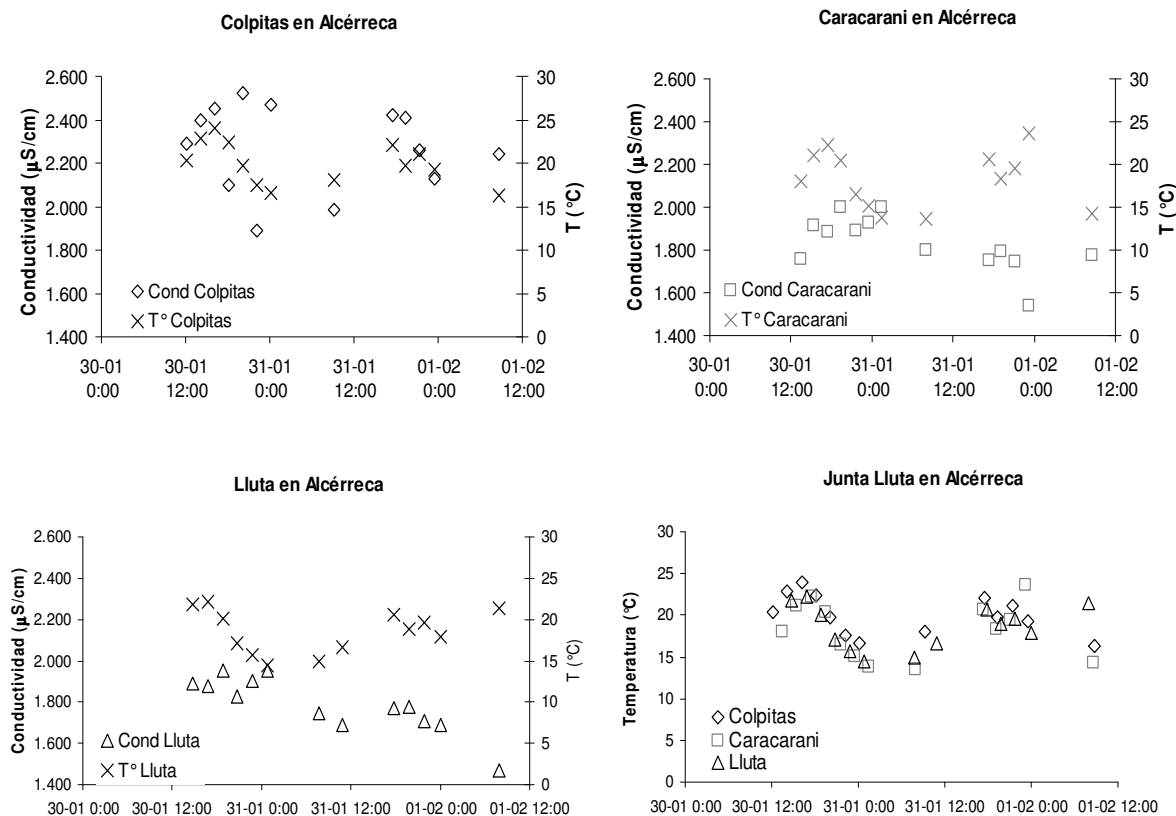


Figura 56. Relación entre conductividad y temperatura, junta Lluta en Alcérreca.

c) Complejación superficial (sorción) sobre oxihidróxidos

El arsénico también puede formar parte de (hidr)óxidos de metales como una fase sorbida. La sorción del arsénico en óxidos de Fe en sistemas naturales ha sido ampliamente documentada en la literatura especializada. En el caso de la cuenca del Lluta, el río Azufre aporta concentraciones no despreciables de hierro, del orden de 100 mg/L, imponiendo así un control para la especiación del arsénico. Si el hierro está presente como un oxihidróxido, que es un sólido, lo más probable es que va a sorber arsénico sobre su superficie y va a generar sedimentos con contenidos importantes de hierro y arsénico. Por eso, es importante también considerar la especiación del hierro, ilustrada en la Figura 16. El hierro puede tener en estos ambientes dos estados de oxidación, +2 y +3. Bajo condiciones reductoras y bajos pHs van a predominar las especies de hierro +2, mientras que para condiciones oxidantes - e.g., sistemas aireados- y pHs levemente ácidos a básicos van a predominar las especies de hierro +3. Los oxihidróxidos justamente son la especie de hierro +3 que predomina para ambientes levemente ácidos a básicos. Esto se observa aguas abajo de la junta del río Azufre, cuando parte del hierro que viene en el Azufre -condiciones que favorecen el hierro +2, como fase disuelta- precipita como oxihidróxido al juntarse con el río Caracarani - condiciones que favorecen el hierro +3, como oxihidróxidos de hierro-. Esto se refleja en Caracarani en Humapalca a través de los precipitados anaranjados que se depositan en el lecho y en Lluta en Alcérreca -Figura 57 y Figura 58-, luego de la junta con el río Colpitas.

También, dependiendo de los caudales y los pHs que se produzcan en estas mezclas, la depositación de oxihidróxidos se puede observar hasta Lluta en Tocontasi.



Figura 57. Sedimentos de Lluta en Alcérreca con alto contenido de oxihidróxidos de fierro.



Figura 58. Sedimentos de Lluta en Alcérreca con alto contenido de oxihidróxidos de fierro. Cerca de 28 mg Fe/g sedimento o un 6% del sedimento como $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Este sedimento tiene del orden de 1,3 mg As/g sedimento, muy probablemente como especie sorbida al fierro.

Los gráficos en la Figura 59 y Figura 60, presentadas a continuación, ilustran la relación entre arsénico y fierro total, para la estación de monitoreo de la DGA Lluta en Panamericana (valores históricos).

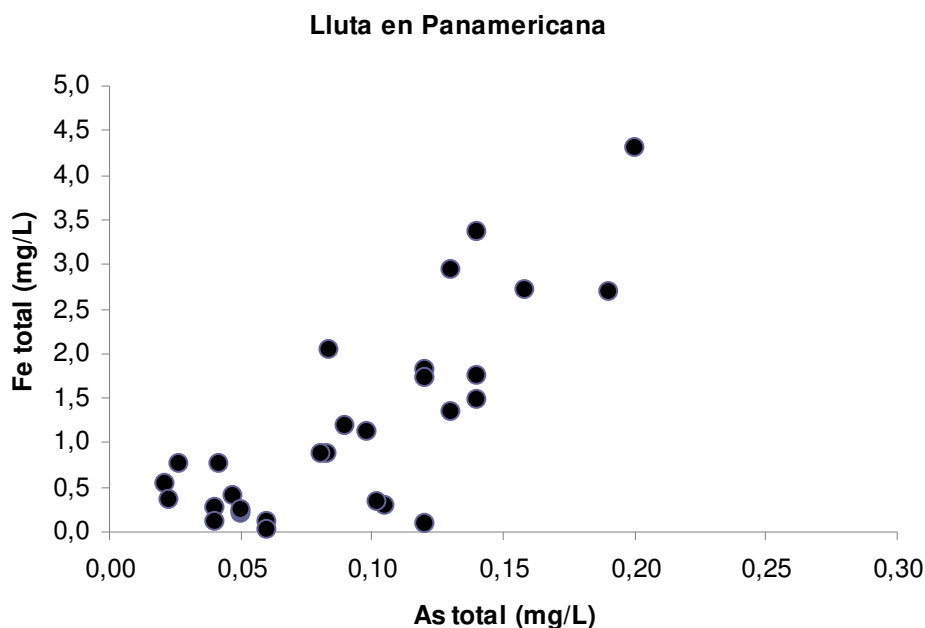


Figura 59. Relación entre arsénico total y fierro total. La correlación aumenta aguas abajo del río Lluta. Datos DGA, estación Lluta en Panamericana.

El gráfico de la Figura 59 presenta una escala ajustada a 5 mg/L de fierro total y 0,3 mg/L de arsénico total como valores máximos. Esto permite homogenizar las escalas, para comparar los valores menores con los mayores. En cambio, el gráfico de la Figura 60 no presenta este ajuste, por lo que reflejan los valores máximos medidos realmente en la estación.

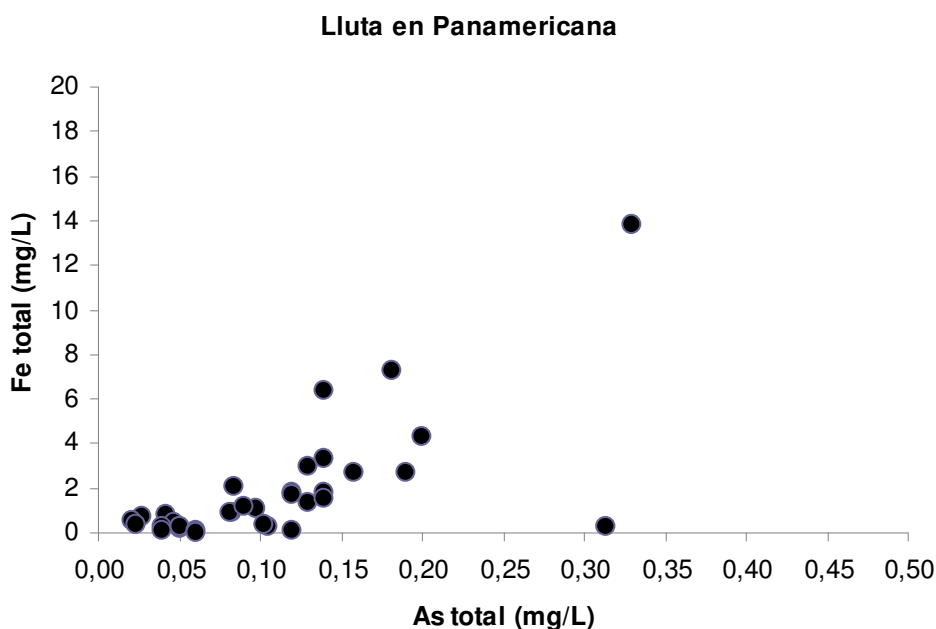


Figura 60. Relación entre arsénico total y fierro total. La correlación aumenta hacia agua abajo del río Lluta. Datos DGA, estación Lluta en Panamericana.

6.2 Preocupaciones de la población

Como se mencionó anteriormente, se realizó una encuesta a la comunidad con el fin de conocer sus preocupaciones relacionadas a la calidad del agua del río Lluta y/o cursos relacionados. Todos los que participaron son agricultores del valle del Lluta y están al tanto de la problemática del boro -principalmente- y de otros minerales presentes. El problema del arsénico fue poco mencionado, lo cual confirma que el principal interés es usar el río como fuente de agua de regadío y no como agua potable. La Tabla 5 muestra las principales preocupaciones que se plasmaron en la ficha, y observaciones pertinentes considerando los antecedentes del estudio.

Tabla 5. Resumen de las preocupaciones de la comunidad del Valle del Lluta.

Curso de agua o lugar de interés	Aspecto específico	Observaciones
Río Lluta	Presencia de contaminantes: Boro, Arsénico, Azufre, Magnesio, "Millo" Minerales. Efectos de Planta Quiborax	La principal preocupación es la presencia de boro que impide un normal funcionamiento de la agricultura. Se menciona el "millo" que se identificó como sulfato de aluminio, un mineral que se encuentra presente en algunas zonas de la cuenca. El EIA de Planta Quiborax declara que sus procesos no generan riles.
Desembocadura río Lluta	Agua de descarte planta desalinizadora. Propuesta del Humedal de la desembocadura como santuario de la naturaleza	Se presencié en dos oportunidades una descarga no autorizada de los riles de la planta desalinizadora al Río Lluta. La descarga oficial se ubica en la desembocadura del río, y se caracteriza por su alta conductividad (14 mS/cm). Existe preocupación en la zona por el posible impacto de contaminantes en el humedal. Con las mediciones realizadas en terreno se comprobó que el impacto en la calidad del agua del río aguas abajo de la descarga es pequeño.
Aportes principales al río Lluta: Río Colpitas, río Azufre	Azufre y minerales	Efectivamente el río Azufre es el que aporta gran parte de las sales disueltas que hay en el río Lluta, en particular sulfatos (SO_4^{2-}). El otro aporte de consideración en la cuenca es la quebrada de Colpitas, de donde proviene la mayor parte del boro y sales disueltas.

Canales varios: Visconti, Sora, Valle Hermoso, Iquieta, Molinos	Calidad de agua y suelos	Los canales provienen del río Lluta, por lo que la calidad del agua es equivalente a la del río. Hubo un derrame de relaves de la planta Quiborax el 2003, la cual ocasionó pérdidas en las cosechas, pero no hubo resultados concluyentes con respecto a contaminación permanente según estudios de la época.
Otros afluentes al río Lluta	Aguas servidas de Putre	A pesar que estas aguas finalmente desembocan en el río Lluta sin tratamiento previo, las concentraciones de materia orgánica medidas son bajas, y existe una dilución tal que permite que aguas abajo el impacto sea prácticamente nulo. No debieran presentar mayor riesgo y cuando exista una planta de tratamiento de aguas servidas el impacto será aun menor.

El principal interés de los agricultores es contar con agua libre de boro, ya que hasta ahora sólo cosechan cultivos resistentes a éste. Este problema, junto con la presencia de minerales en los ríos -como los mencionados magnesio y azufre-, y las aguas servidas de Putre fueron los más mencionados en la ficha. Este estudio no ha encontrado evidencia que esta descarga llegue a afectar la calidad del río Lluta en el valle, por lo que se le puede informar a la población que el problema principal es el alto contenido de sales, boro y arsénico, y no las aguas servidas de Putre.

7. Tecnologías de control de la calidad del agua. Aspectos generales para establecer una base conceptual común

El objetivo del control de la calidad del agua es obtener agua en calidad y cantidad que cumpla los objetivos predeterminados, en función del uso que se dará a las fuentes.

El control de la calidad del agua se puede obtener a través de:

- gestión de las fuentes de contaminantes
- mezcla o separación de fuentes de distinta calidad
- sistemas de tratamiento
- una mezcla de los anteriores

La gestión de las fuentes de contaminantes consiste en manejar las concentraciones, flujos máxicos, y/o características temporales de la emisión de las especies químicas que causan la contaminación.

La mezcla o separación de fuentes consiste en combinar o apartar cursos de agua con el fin de obtener ciertas características físicas, químicas y/o biológicas para los efluentes resultantes de dichas acciones.

Los sistemas de tratamiento consisten en cambiar las condiciones físicas, químicas y biológicas a través de un sistema diseñado, para que el efluente cumpla con las características deseadas.

Los sistemas de tratamiento típicos se realizan mediante plantas de tratamiento, pero en algunos casos, el tratamiento también se ha hecho a escala de escurrimientos y embalses, como es el caso del acueducto de Los Ángeles -ver Cuadro 1-.

Cuadro 1. Ejemplo de tratamiento a gran escala: Acueducto de Los Ángeles.

La presencia de arsénico en el acueducto de Los Ángeles se atribuye a los aportes geotermales en sus tributarios. Aunque las concentraciones históricas bordeaban los 0,02 mg/L, para adelantarse al estándar de la OMS (0,010 mg/L desde enero 2001) se decidió intervenir para bajar esta concentración. Esto se logró con proceso de coagulación-floculación, mediante la adición de FeCl_3 y un polímero, provenientes de la planta de tratamiento de Cottonwood, ubicada 27 km al norte de la Embalse Haiwee. En este lugar es donde se realiza la sedimentación de las partículas arsenicadas. Esta medida permitió que desde 1996, las concentraciones fueran de 0,025 mg/L antes de Cottonwood y de 0,0083 mg/L bajo Haiwee. Cabe destacar que considerando el caudal de 17 m³/s y el porcentaje de remoción, se han acumulado 40 toneladas de arsénico en los sedimentos del embalse. Esta situación, en particular la especiación del arsénico en estos sólidos, ha sido estudiada debido al riesgo que podría significar la resuspensión y/o liberación del arsénico desde la fase sólida a la fase acuosa (Kneebone et al., 2002).

7.1 Procesos unitarios de tratamiento de aguas

Las plantas de tratamiento se forman a partir de procesos unitarios. Los procesos unitarios típicos de tratamiento son:

7.1.1 Coagulación/floculación

Consiste en la desestabilización de los sólidos suspendidos, producto de la adición de un coagulante. Los coagulantes más usados son sales de fierro y aluminio, que se encargan de neutralizar las cargas de las partículas para que puedan unirse. Luego, se denomina floculación al proceso de agrupación de partículas, para su posterior sedimentación y/o filtración.

Un esquema del proceso de floculación puede observarse en la Figura 61.

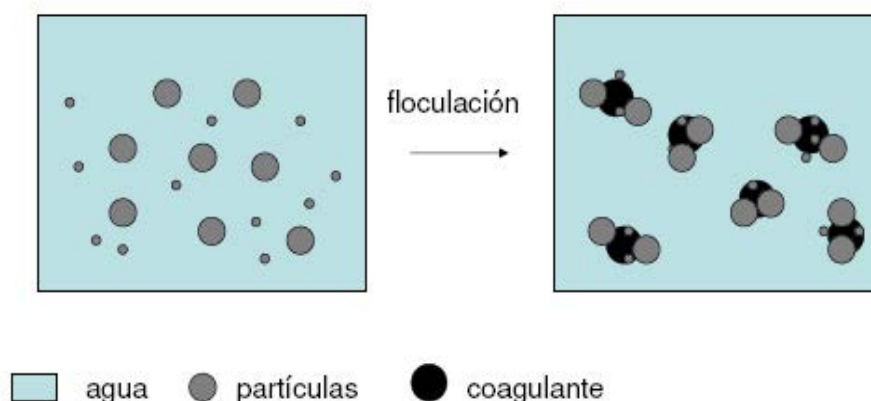


Figura 61. Las partículas se juntan y forman flóculos, que luego sedimentan.
Adaptado de Kalenda (Kalenda, 2002).

7.1.2 Sedimentación

Proceso de separación mediante gravedad de una suspensión de partículas en dos corrientes: líquido clarificado y líquido espeso. El objetivo es obtener un efluente libre de sólidos suspendidos. El proceso de sedimentación puede observarse en la Figura 62.

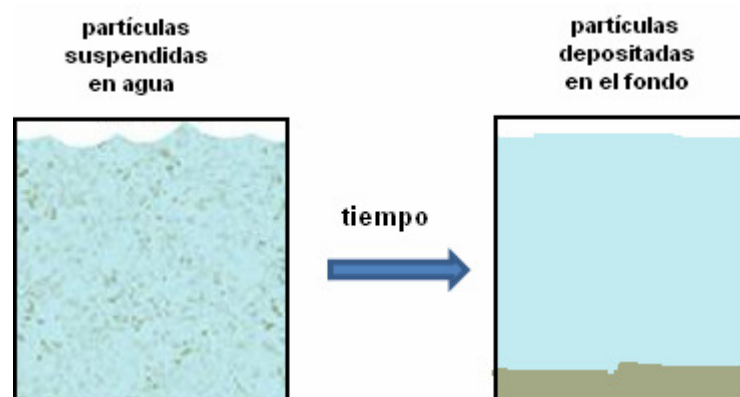


Figura 62. Representación esquemática del proceso de sedimentación. Las partículas se depositan en el fondo por efecto gravitatorio. Adaptado de Casiday et al. (Casiday et al., 2008)

7.1.3 Filtración

Se hace pasar el afluente por un medio permeable, el cual retiene sólidos según el tamaño de poro de éste. Cumple más eficientemente el mismo objetivo de la sedimentación, pero a mayor costo.

La Figura 63 esquematiza el proceso de filtración que se realiza a escala menor, por ejemplo en un laboratorio de calidad de agua.

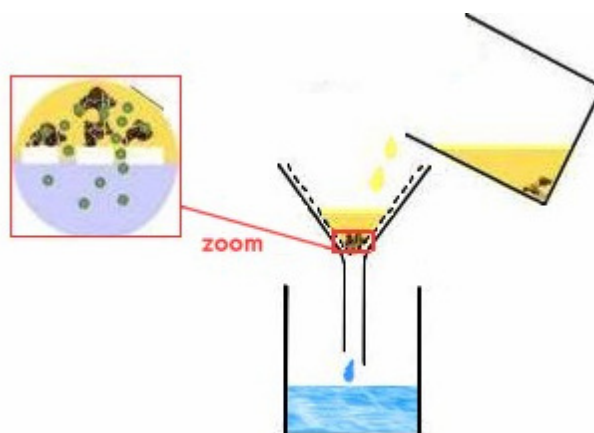


Figura 63. Separación de las partículas de la fase acuosa mediante un filtro.
Adaptado de MOE, SG (Ministry of Education Singapore Government, 2007).

7.1.4 Adsorción

En este proceso, sustancias disueltas en el afluente se adhieren a la superficie de un sólido. El adsorbente más común usado en tratamiento de agua es el carbón activado, debido a su superficie específica que es del orden de $1.000 \text{ m}^2/\text{g}$. También existen otros medios sorbentes que se han desarrollado para distintos contaminantes. La Figura 64 presenta un esquema del proceso de adsorción.

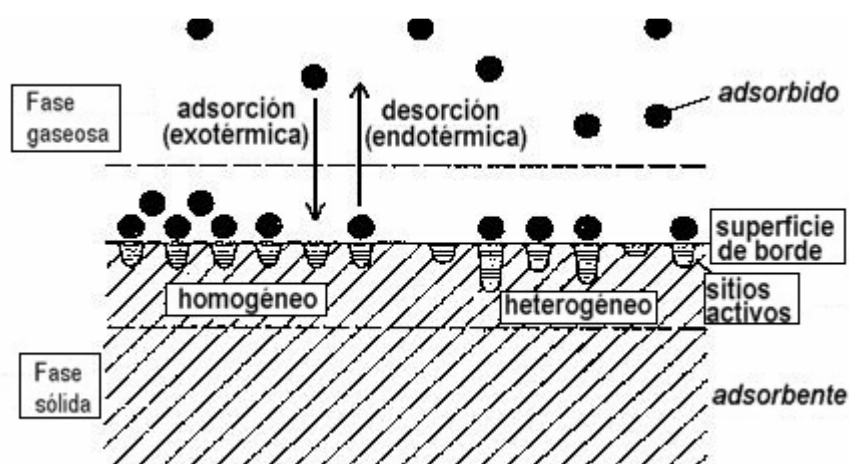


Figura 64. Esquema de la adsorción: el adsorbido se adhiere a la superficie del adsorbente. El proceso inverso se conoce como desorción. Adaptado de Hennig and Degel (Henning and Degel, 1990).

Dentro de este proceso, se encuentra el intercambio iónico, en el cual los iones en la fase sólida son cambiados por un ión presente en el afluente. La fase sólida es típicamente una resina de intercambio iónico que ha sido escogida porque adsorbe preferentemente el contaminante particular. La resina contiene un gran número de grupos ionizados unidos electroquímicamente a su superficie, los cuales son cambiados por iones de carga similar que poseen mayor afinidad con la resina.

La Figura 65 muestra el funcionamiento de una resina de intercambio iónico de Na y Cl.

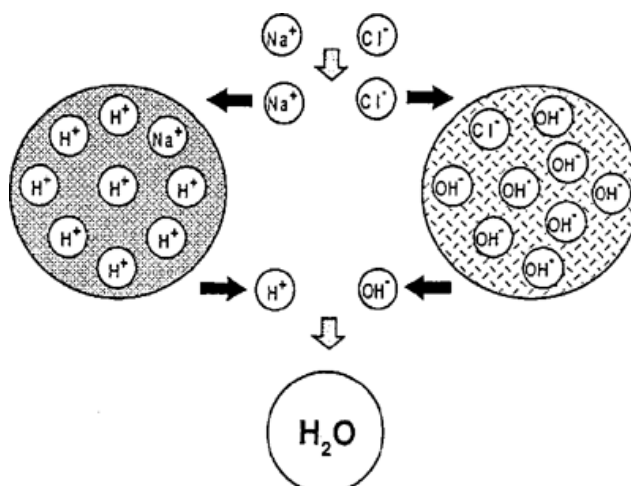


Figura 65. Representación esquemática del intercambio iónico: el sodio reemplaza al protón, mientras el hidroxilo es reemplazado por el cloruro (Aqua Technology Water Stores, 2005).

7.1.5 Precipitación

Se adicionan reactivos químicos que permiten que las especies de interés a remover, pasen de fase acuosa a fase sólida, para que así se puedan separar posteriormente mediante filtración y/o sedimentación.

La Figura 66 representa el proceso de precipitación.

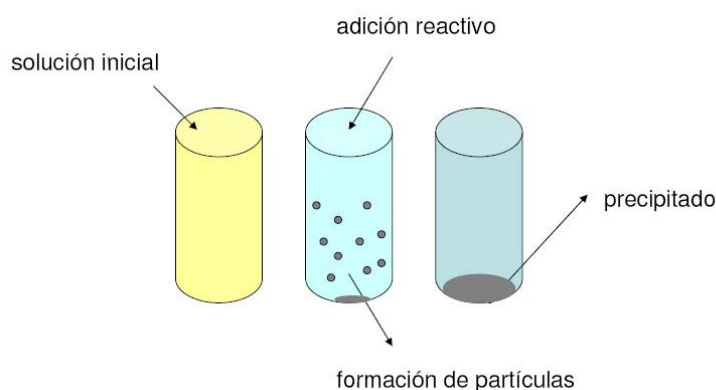


Figura 66. Durante la precipitación química, se forma un sólido en la solución gracias a una reacción química. Este se denomina precipitado, mientras que el líquido remanente sobre el sólido se denomina sobrenadante. Elaboración propia.

7.1.6 Membranas

Son barreras selectivas que permiten el paso de algunas especies, y bloquean otras. Se requiere hacer pasar el afluente a través de estas membranas, las cuales deben ser regeneradas a medida que se usan.

Dentro de estos procesos, destaca por ejemplo el proceso de osmosis inversa -representado en la Figura 67- que es la más antigua tecnología de tratamiento de membrana. Este proceso produce agua casi pura al mantener un gradiente de presión a través de la membrana, mayor a la presión osmótica del agua que entra para ser purificada. Para este proceso el agua tratada debe contener bajo contenidos de otros iones en solución y sólidos suspendidos.

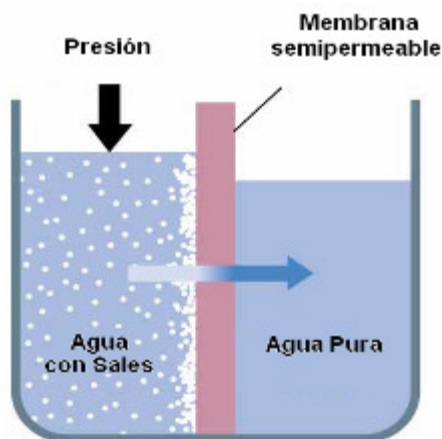


Figura 67. Proceso de osmosis reversa. Las sales quedan retenidas en la membrana.
Adaptado de Vertex (Vertex Hydropore, 2008).

7.1.7 Desinfección

Tiene por objeto destruir aquellos microorganismos que pueden causar enfermedades. Para estos efectos, por ejemplo, se usa el cloro ya que su alto poder oxidante altera la estructura química de la célula bacteriana, inhibiendo los procesos enzimáticos requeridos para la vida.

La Tabla 6 resume qué tipo de contaminantes abate cada uno de los sistemas.

Tabla 6. Remoción de contaminantes por tipo de tratamiento.

Tratamiento	Contaminante
Coagulación/floculación	Sólidos suspendidos
Sedimentación	Sólidos suspendidos
Filtración	Sólidos suspendidos
Adsorción	Según el medio sorbente, por ejemplo compuestos orgánicos para el carbón activado
Intercambio iónico	Iones específicos dependiendo de la afinidad de la resina utilizada
Precipitación	Más usada para Ca, Mg, Fe, Mn
Membranas	Según la membrana, usadas más comúnmente para remover iones que aportan salinidad (Na,Cl)
Desinfección	Microorganismos patógenos

Sobre la base del cuadro anterior, la Tabla 7 hace una síntesis de los sistemas que podrían abatir boro y arsénico, sin considerar los costos involucrados.

Tabla 7. Tratamientos factibles para la remoción de B y As.

Tratamiento	Boro	Arsénico
Coagulación/floculación	X*	X*
Sedimentación	X*	X*
Filtración	X*	X*
Adsorción	X	X
Precipitación	X	X
Membranas	X	X

*= requiere que el boro y/o el arsénico estén particulados y no disueltos

7.2 Tecnologías de tratamiento para boro y arsénico

Sobre la base de la experiencia de remoción de arsénico en el mundo, se sabe que el arsénico se remueve del agua para uso en agua potable. En general, los tratamientos usados son la precipitación con FeCl_3 , adsorción en medios sorbentes -alúmina activada, hidróxidos de hierro, óxidos de titanio-, intercambio iónico y osmosis inversa. La Tabla 8 resume las eficiencias de remoción para los principales tratamientos.

Tabla 8. Eficiencias típicas y pérdidas de agua para tratamientos de As.

Tratamiento	Eficiencia remoción de As (V)	Pérdida de agua
<i>Procesos de sorción</i>		
Intercambio iónico	95%	1 – 2 %
Alúmina activada (sin regeneración)	95%	1 – 2 %
Sorbentes basados en hidróxido férrico	Hasta 98%	1 – 2 %
<i>Procesos de membrana</i>		
Osmosis inversa	>95%	15 – 50 %
<i>Procesos de coagulación/precipitación</i>		
Coagulación/microfiltración	90%	5 %
Coagulación/filtración clásica mejorada		
Con alúmina	< 90%	1 – 2 %
Con cloruro férrico	95%	1 – 2 %

Fuente: USEPA (United States Environmental Protection Agency, 2000) .

Como puede observarse, en general la eficiencia de remoción es relativamente alta. Una diferencia relevante es la pérdida de agua producto del tratamiento. En el caso de la osmosis inversa esta pérdida es significativa con respecto al agua tratada.

La Tabla 9 compara los principales factores por tipo de tratamiento de remoción de arsénico.

Tabla 9. Comparación de los sistemas de remoción de arsénico.

Factores	Procesos de sorción			Procesos de membrana	Procesos de precipitación	
	Intercambio iónico	Alúmina activada	Sorbentes basados en hidróxido férrico	Osmosis inversa	Coagulación/ filtración clásica mejorada	Coagulación/ microfiltración
Eficiencia de remoción	95%	0,95	hasta 98%	<95%	95% (FeCl ₃) <90% (Alum)	0,9
Pérdida total de agua	1-2%	1-2%	1-2%	15-75%	0	0,05
Requiere pre-oxidación	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Capacitación del operador	Alta	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Generación de residuos	Resina usada, salmuera, agua retrolavado	Medio usado, agua retrolavado	Medio usado, agua retrolavado	Agua rechazada	Agua retrolavado, lodos	Agua retrolavado, lodos
Otras consideraciones	Posiblemente requiera ajuste de pH, prefiltración, la salmuera sería residuo peligroso	Posiblemen te requiera ajuste de pH, prefiltración	Posiblemen te requiera ajuste de pH, prefiltración	Alta pérdida de agua afluyente (15-75%)	Posiblemente requiera ajuste de pH	Posiblemente requiera ajuste de pH
Costo sistema centralizado	Medio	Medio	Medio	Alto	Bajo	Alto

Fuente: Adaptado de USEPA (United States Environmental Protection Agency, 2000).

Con respecto a los costos, aproximadamente, tratar un m³ de agua con arsénico puede costar entre \$150 y \$500. En la literatura no se encuentran sistemas para remover As de agua para riego. Si se deseara utilizar el estándar de agua potable, el costo anual de tratar 1 L/s fluctuaría entre 4,7*10⁶ \$/año y 15,8*10⁶ \$/año.

La remoción del boro es un proceso complejo. Existen diversas tecnologías para su remoción basadas en diferentes principios y mecanismos fisicoquímicos. Sin embargo, no hay evidencia sobre remoción significativa por los métodos tradicionales de tratamiento como coagulación, floculación, sedimentación-filtración o intercambio iónico típico. Sobre la base de la experiencia de remoción de boro en el mundo, se sabe que el boro se remueve para aguas que se usarán como agua potable. Típicamente se usa intercambio iónico y osmosis inversa. Existen también otros métodos menos comunes utilizados, pero muchos de ellos aun están en la etapa experimental. En general, los sistemas de abatimiento de boro se utilizan para agua de mar. En menor medida existen sistemas para remoción de boro de efluentes industriales.

La aplicación de resinas de intercambio iónico selectivas para el boro (Simonnot et al., 2000) (Melnik et al., 2007) es un método probado para el tratamiento de aguas con bajos niveles de boro, en especial para tratar aguas destinadas al consumo humano. La resina comercial que se utiliza es la Amberlita IRA-743 (XE-243), una resina sorbente sintética de N-Metilglucamina. Sus principales características son:

- Puede disminuir la concentración de boro desde 100 a menos de 1 mg/L
- Es específica para el borato B(OH)_4^-
- Su máxima capacidad de sorción es de 6,7 mg B/ g resina, a pH 8

Sin embargo, presenta inconvenientes al tratar aguas con altas concentraciones de iones en solución, y requiere de costosas etapas de regeneración y mantenimiento para conservar la efectividad de la resina.

Por su parte, la osmosis inversa se caracteriza por su efectividad, puesto que es factible alcanzar concentraciones inferiores a 0,5 mg/L que es el estándar recomendado por la OMS (Xu and Jiang, 2008).

A mayor pH del agua, mayor es la eficiencia de remoción, debido a la especiación del sistema del boro a pH alto pues predomina el borato B(OH)_4^- el cual es más fácil de remover debido a su carga negativa. La principal desventaja de este tipo de tratamiento es el volumen de agua descartada debido al proceso. Se pierden entre 2 y 20 litros por cada litro de agua tratada (Xu and Jiang, 2008).

Dentro de las tecnologías emergentes está la electrodialisis. Esta es una tecnología en estudio para el tratamiento de aguas con altas concentraciones de boro, mayores a 50 ppm. Posee la ventaja de no depender de parámetros como el pH y no presenta los problemas de *fouling* de métodos de filtración o membranas. Sin embargo, presenta inconvenientes al tratar aguas con elevadas concentraciones de algunos iones mayoritarios como el cloruro y el sulfato (Xu and Jiang, 2008).

De la información recopilada se observa que no existen sistemas para remover boro del agua para riego. Si se deseara removerlo a una concentración para agua de riego (0,75 mg/L) y considerando valores de referencia de los sistemas de tratamiento descritos, el costo de tratar 1 m³ de agua fluctúa entre \$280 y \$620. Para tratar 1 L/s anualmente costaría entre $8,8 \times 10^6$ \$/año a $19,5 \times 10^6$ \$/año.

La Tabla 10 resume las principales características de los sistemas de tratamiento para boro.

Tabla 10. Comparación de los sistemas de remoción de boro.

Factores	Intercambio iónico (IE)	Osmosis inversa (RO)	Electrodialisis (ED)
Eficiencia de remoción	88-98,9%	85-98% (según pH y membrana)	97%
Pérdida total de agua	1-1,5%	Entre 2 y 20 litros por litro de agua tratada	
Generación de residuos	*Columna de intercambio iónico acidificada *Necesidad de regeneración de columna *Vida útil resina 10 años *Costo reposición resina \$19/L *Mantenimiento anual 400 horas	*Vida útil membrana 3-6 años. *Costo reposición membrana \$72/m ² *Costo mantenimiento \$4 por día *Reemplazo de membranas recomendado cada 1 año	*Vida útil de membrana 80.000 horas *Costo de reposición membrana \$100/m ²
Otras consideraciones	*Máxima capacidad de sorción es a pH 8 *Específica para borato B(OH) ₄ ⁻ *Problemas con altas concentraciones de iones disueltos *Requiere etapas de regeneración y mantenimiento	*A mayor pH mayor eficiencia de remoción	*Problemas con altas concentraciones de iones cloruro y sulfato
Costo US\$/m ³	* 0,0959 (sólo etapas IE) * 0,03 + costos regeneración (incluye etapa previa RO)	0,027-0,06	1,27

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la implementación de estas tecnologías a caso específico del río Lluta, la Fundación para la Innovación Agraria FIA financió el proyecto “Desarrollo de un sistema económico para la reducción de la concentración de boro en aguas de varias cuencas problemáticas de la zona Norte hasta niveles que viabilicen su uso en el riego para permitir una agricultura diversificada” ejecutado por la Universidad de Tarapacá, basado en una resina de intercambio iónico, una de las tecnologías descritas anteriormente. Durante la

presentación final de este proyecto realizado en Arica el 28 de julio del 2008, el equipo consultor mencionó los principales aspectos respecto a este proyecto a la comunidad y organismos relacionados:

- Mostró capacidad de remover boro bajo condiciones ideales de operación, con agua del río Lluta.
- Funciona con agua potable y energía, lo que hace que el costo dependa de estas variables.
- Esta alternativa todavía está en evaluación y requiere mejorar sistema de pretratamiento del agua, operabilidad, y asegurar costo-efectividad.

El Cuadro 2 resume la información obtenida para la única planta de tratamiento en operación a la fecha usando esta tecnología, en base a lo desarrollado por la UTA.

Cuadro 2. Funcionamiento e implementación de sistema de tratamiento de remoción de boro.

El sistema de tratamiento basado en resina de intercambio iónico se instaló en octubre del 2007 en la empresa Europlant Ltda, con un costo de \$10 millones. Requiere 180 L de resina, con un costo de US\$15 por litro. Esta resina debiera durar varios años, aunque no se dispone de información de la planta instalada. Usa dos bombas de 1 HP para generar un flujo ascendente. La tasa de producción corresponde a 1600 L/h por 10 horas de ciclo. La concentración de boro en el efluente es de 0,3 mg/L, nivel bajo los 0,5 mg/L para los cuales se ha observado efectos negativos.

Con respecto a la regeneración de la resina, se requiere por lavado 10 L de H_2SO_4 y 5 L de NaOH. Aproximadamente, por cada 20 m³ de agua tratada se generan 5 m³ de desecho, que deben ser dispuestos. En la imagen de izquierda abajo se observa el sistema de manejo de residuos para las aguas de descarte. La imagen de la derecha muestra parte de las instalaciones del sistema. Es importante destacar que en el momento de la visita la planta no se encontraba en operación y la empresa se abastecía de otras fuentes de agua a través de un camión aljibe.



Fuente: Visita a terreno y entrevista a Camilo Urbina Alonso, Ingeniero Agrónomo UC, representante de Asitec Ltda., comercializadora de la solución. Esta entrevista fue realizada en terreno el 18/08/08 en dependencias de Europlant Ltda, única instalación en funcionamiento a la fecha. A la visita asistió el Jefe de Proyecto, el Jefe de Proyecto Alterno y el Inspector Fiscal.

8. Alternativas para mitigación de boro y arsénico

Como se mencionó anteriormente, el objetivo de establecer medidas de control de la calidad del agua es obtener agua en cantidad y calidad que cumpla con los objetivos predeterminados. En este caso, el agua del valle del Río Lluta se requiere para consumo humano en poblaciones que no tienen acceso a agua potable y fundamentalmente para riego en la zona baja del río. En el estudio realizado por Ingendesa para analizar la prefactibilidad para la construcción de un embalse en la zona de Chironta (Dirección de Obras Hidráulicas, 2004) se especifica que los suelos con factibilidad agrícola de la zona entre Vinto y Panamericana son:

- Sector alto: 713 hectáreas
- Sector medio: 747 hectáreas
- Sector bajo: 949 hectáreas

El sector bajo es el que tiene mayor problema de drenaje y de salinidad. En total, los suelos regables corresponden a 2.108 hectáreas. Si se usara riego tecnificado, se podrían agregar algunas áreas de riego y disminuir drásticamente el consumo de agua. Bajo estas condiciones, el área posible de regar sería de 2.800 hectáreas y el caudal necesario, de 750 L/s.

El análisis de la información disponible de calidad del agua de la cuenca del Río Lluta y de los datos recolectados de las campañas de terreno indica dos aspectos fundamentales para las decisiones de la mitigación del boro y el arsénico:

1. La contaminación por boro y arsénico proviene de dos fuentes principales. El río Azufre contiene gran cantidad de arsénico, sulfatos, fierro y boro, mientras que el río Colpitas, y más específicamente los afloramientos en las borateras de aguas arriba del pueblo de Colpitas, contienen gran cantidad de boro, sales y arsénico.
2. El efecto de las precipitaciones durante el invierno boliviano en la dilución de los contaminantes es puntual, de manera que las concentraciones disminuyen durante un tiempo muy corto.

De acuerdo al análisis de la información, un embalse en el cauce del río Lluta mantendría su salinidad y altas concentraciones de boro. Sin embargo, el embalse tendría un efecto de control de crecidas y de modulación de cambios bruscos de concentraciones de especies en el agua y del pH. La posibilidad de hacer un embalse a un lado del cauce que aproveche sólo el agua en las temporadas de crecidas es cuestionable puesto que el efecto de dilución es puntual y la concentración de boro, arsénico y conductividad no disminuyen significativamente. Detalles más específicos con respecto a posibles efectos del embalse se presentan en el punto 9.

8.1 Situación general y alternativas

Del análisis de los datos de calidad del agua y de las condiciones de la cuenca, las alternativas que parecen más adecuadas son:

1. Selección de agua de fuentes de buena calidad

2. Mitigación de contaminantes utilizando fuentes de aguas de diferentes calidades
3. Intervención de fuentes de mala calidad.

8.2 Selección de fuentes de buena calidad

En la cuenca alta del río Lluta existen quebradas menores con aguas de muy buena calidad según las mediciones en terreno y los análisis realizados en este estudio. Existen al menos cuatro quebradas que desembocan en la ribera oriente del río Caracarani entre la junta del río Azufre y la quebrada de Colpitas que tienen concentración de boro y arsénico muy bajas (para el boro, entre 0,1 y 0,5 mg/L B a excepción del punto 357 que reportó 6,5 mg/L, mientras que para el arsénico se reportó como máximo 0,05 mg/L), además de una conductividad menor a 0,8 mS. Por otra parte, la quebrada de Allane -antes de desembocar en la quebrada de Colpitas- según los análisis también presenta una calidad del agua similar, aunque posee una mayor concentración de boro (5,4 mg/L). El esquema de la cuenca de la Figura 68 permite visualizar la ubicación de estos cursos. Dicho esquema se utilizó para presentar los principales resultados de las mediciones de parámetros relevantes de calidad, presentados en la Figura 69, Figura 70, Figura 71 y Figura 72, para las principales quebradas y Caracarani en Humapalca, que resulta ser el curso más relevante con mejor calidad. Sus respectivas cuencas pueden observarse en la Figura 73. Por las estimaciones de caudales hechas en terreno, se estima que estas quebradas podrían representar un aporte de aproximadamente 315 L/s de aguas de calidad muy superior a la del río Lluta.

La Quebrada Socoroma (también denominada Quebrada Aroma) se identificó como de buena calidad: 0,3 mg/L B, conductividad de 0,87 mS y no se detectó arsénico. Sin embargo, en terreno se observó que la mayor parte del agua es aprovechada por la localidad de dicho poblado mediante acumulación en piscinas, razón por la cual no se ha considerado como disponible para su uso en la zona baja de la cuenca. Situación similar ocurre con la Quebrada Huayla ubicada aguas abajo de Lluta en Alcérreca, pero en este caso los caudales observados son tan pequeños (entre 2 y 4 L/s) que se considera muy bajo para efectos de las alternativas presentadas por proyecto, además que en la zona viven familias que aprovechan dicho recurso. Las mediciones de calidad arrojaron concentraciones de boro del orden de 2 mg/L, de arsénico total de 0,035 mg/L y conductividad de 1 mS, que resulta ser inferior a la de la Quebrada Socoroma.

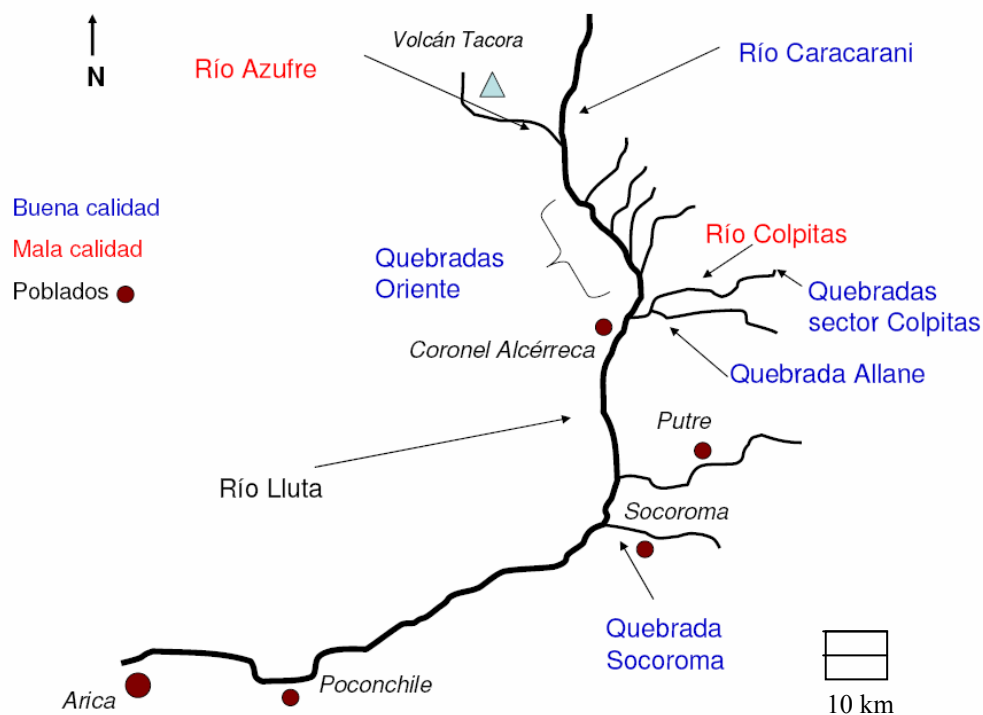


Figura 68. Esquema de los principales aportes al río Lluta que tienen agua de buena calidad.

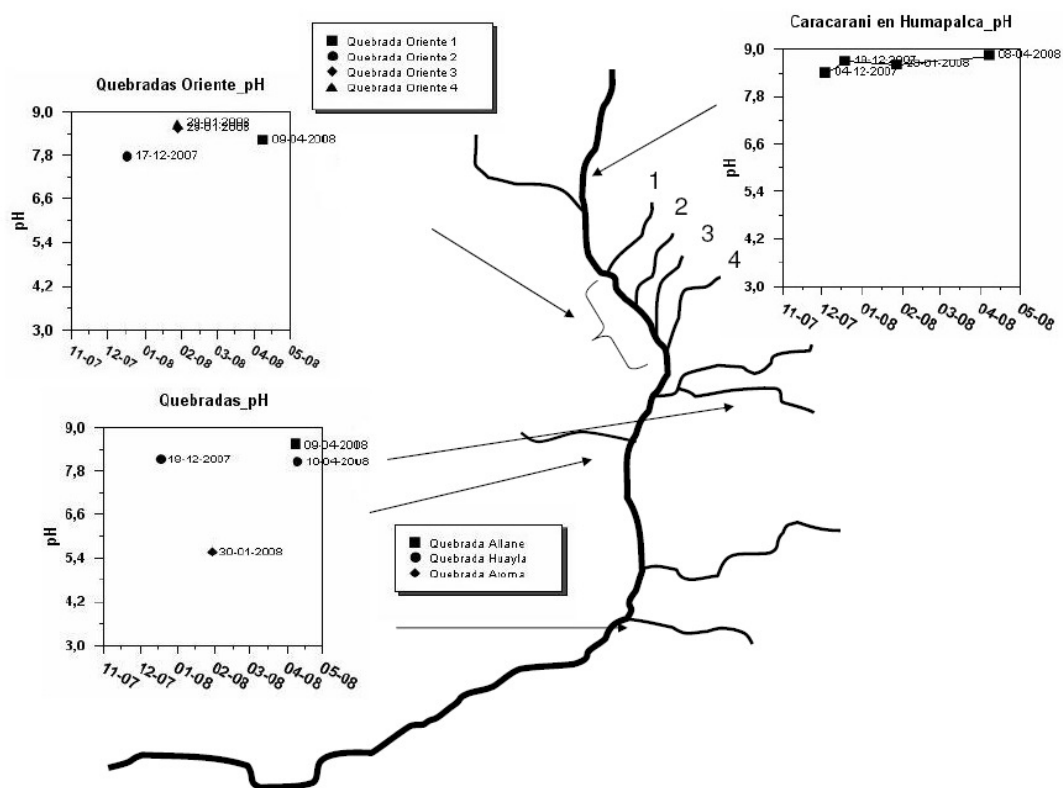


Figura 69. Mediciones de pH reportadas por este estudio, cursos de buena calidad.

La Figura 69 muestra que los cursos son más bien alcalinos, a excepción de la Quebrada Socoroma. Caracarani en Humapalca prácticamente no presentó variación en las mediciones de pH de terreno.

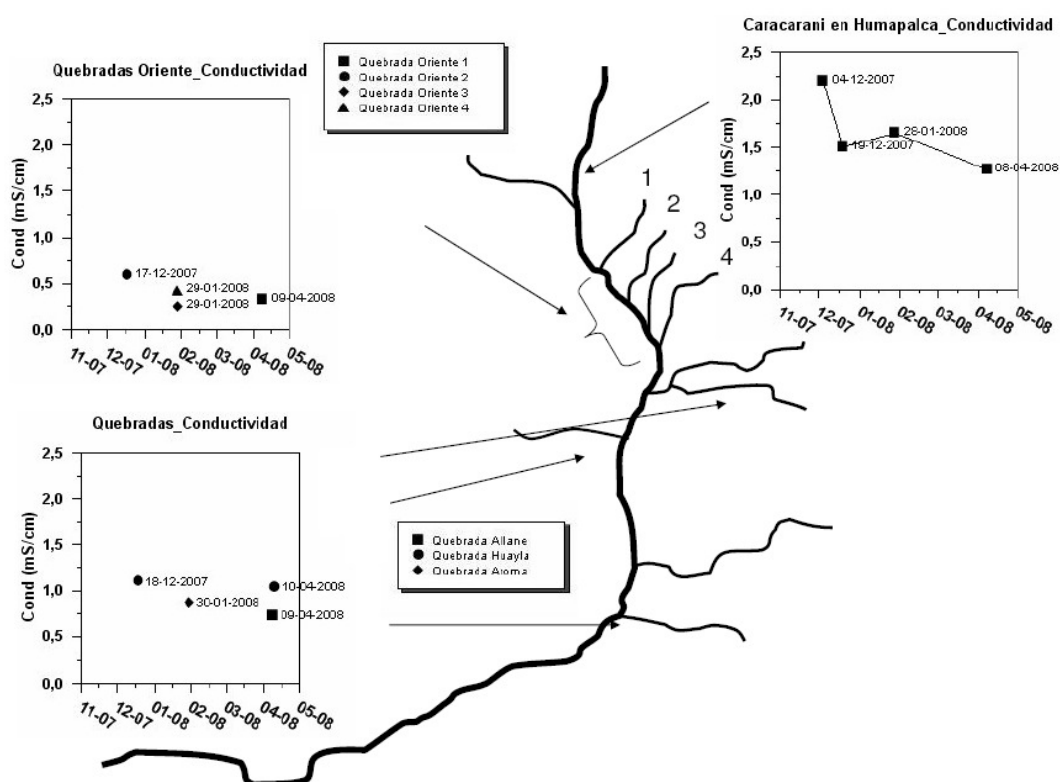


Figura 70. Mediciones de conductividad reportadas por este estudio, cursos de buena calidad.

En la Figura 70 se aprecia que las Quebradas Oriente son las que presentan menor salinidad, seguida por las Quebradas Allane, Socoroma y Huayla. Caracarani en Humapalca presentó valores superiores a 1 mS.

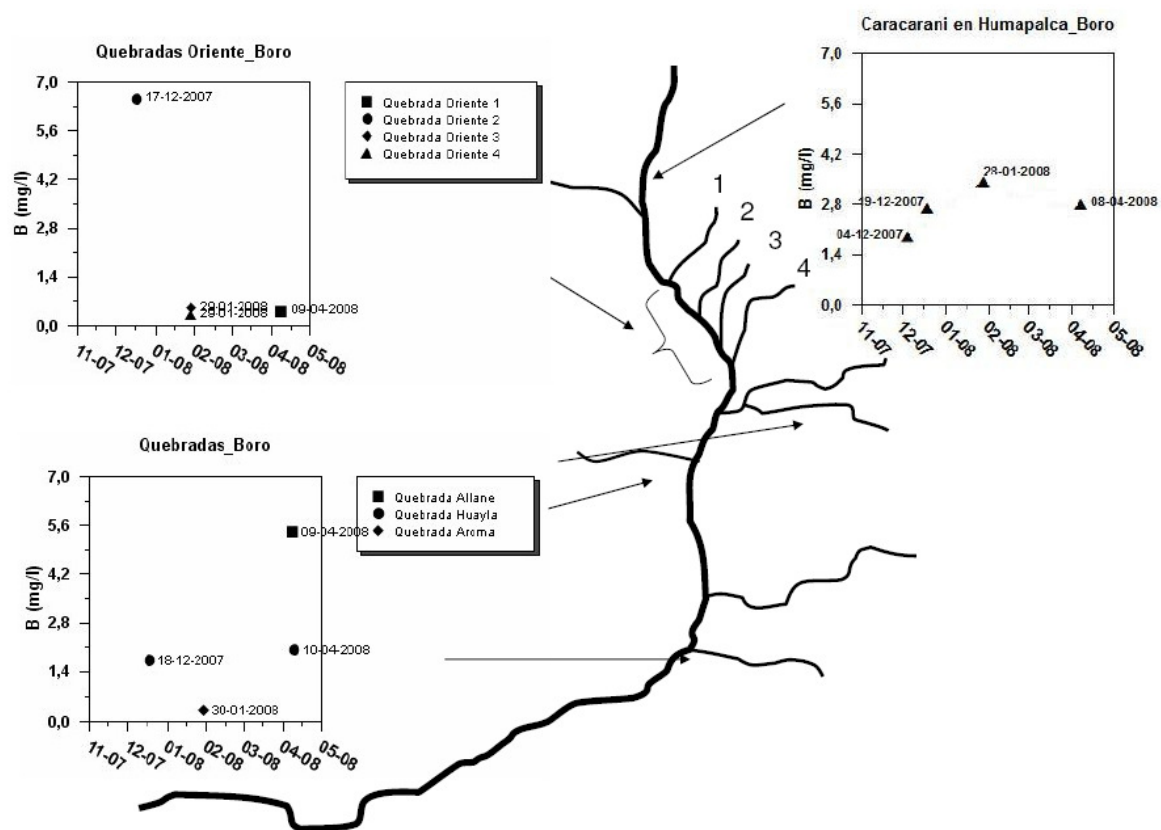


Figura 71. Mediciones de boro reportadas por este estudio, cursos de buena calidad.

La Figura 71 muestra que las Quebradas Oriente 1, 3, 4 y Quebrada Aroma son los cursos superficiales con menores concentraciones de boro; seguidos por la Quebrada Huayla y Caracarani antes de Colpitas. La Quebrada Allane y Quebrada Oriente 2 superan al resto de los cauces menores.

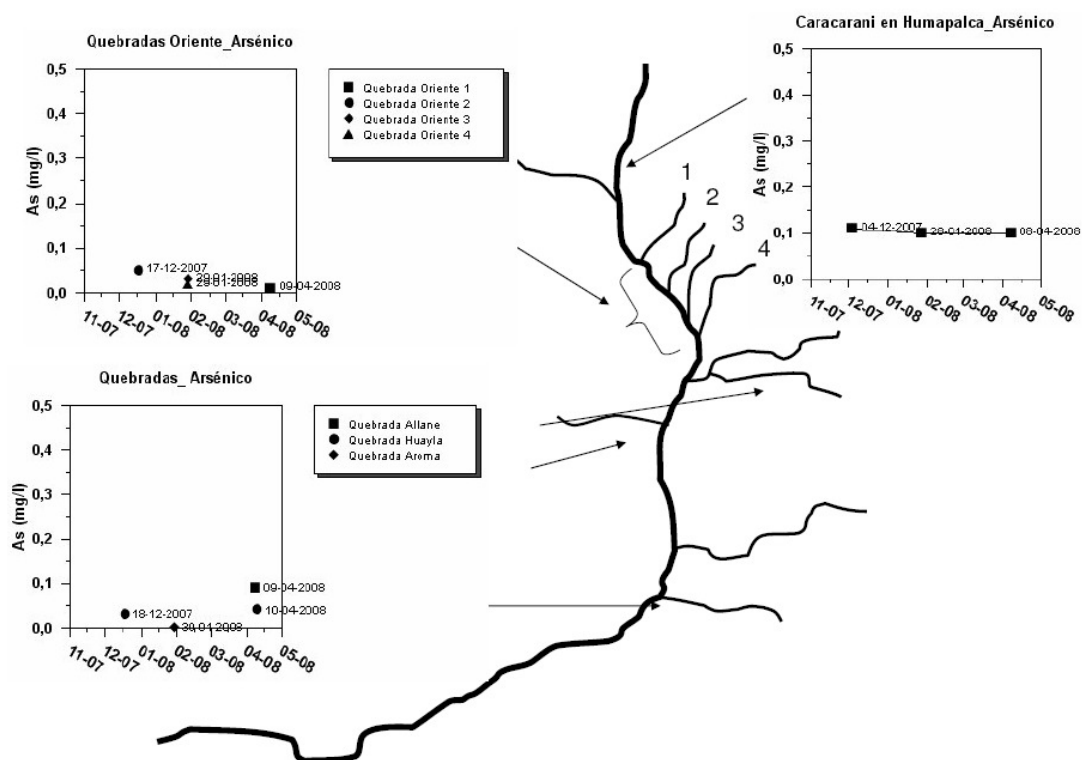


Figura 72. Mediciones de arsénico reportadas por este estudio, cursos de buena calidad.

La Figura 72 permite ver que Caracarani en Humapalca presenta las mayores concentraciones de arsénico, mientras que como ya se mencionó, en la Quebrada Aroma no fue detectado ($<0,006$ mg/L).

En el sector de Colpitas, se observó que las quebradas hacia el norte y aguas arriba de las borateras también tienen agua de buena calidad. Existen alrededor de cuatro quebradas de este tipo, que por sus áreas aportantes se estima que podrían significar aproximadamente 20 L/s. Es decir, existen alrededor de 350 L/s de agua de buena calidad que actualmente se mezclan con aguas de las quebradas de Colpitas y de Caracarani aguas abajo del río Azufre, donde se diluyen y la calidad conjunta empeora considerablemente. Los datos de calidad se muestran en la Tabla 11, presentada a continuación. La ubicación geográfica de éstos y todos los puntos de muestreo se presentan en la sección Anexos.

Tabla 11. Principales datos de calidad del agua de quebradas menores.

Nombre	GPS	pH	Conduct (mS/cm)	B total (mg/L)	As total (mg/L)	Q (L/s)	O ₂ (mg/L)	Turbidez (NTU)
Quebrada a Caracarani en SicaSica	438	8,2	0,32	0,4	0,01	20	7,0	-
Quebrada a Caracarani por Hospicio-j Caracarani	357	7,8	0,594	6,5	0,05	7	-	0,6
Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-bajo	288	8,5	0,252	0,5	0,03	92,6	6,3	7,0
Quebrada a Carac oriente por Quecalani-Pahuta	289	8,6	0,427	0,3	0,016	198,2	6,7	2,9
Quebrada a Carac oriente Qcal-Phta en Phta-Canl	290	8,8	0,302	0,4	-		8,1	-
Quebrada a Colpitas antes borateras	428	8,5	0,1267	1,9	<0,004	7	7,7	1,5
Quebrada a Colpitas-poniente borateras	212	7,9	0,687	0,09	0,008	0,7	-	15,0
Quebrada Allane	339	8,5	0,728	5,4	0,09	15,0	11,2	6,6

La Tabla 12 muestra estimaciones de los caudales medios de las cuencas con aguas de buena calidad que se hicieron usando datos del Balance Hídrico de Chile (Dirección General de Aguas, 1987). El valor de la escorrentía en mm/año para la cuenca de Lluta en Alcérreca es de 38,2 mm/año y el de Caracarani en Humapalca es de 49,4 mm/año. Dado que no hay información específica para las cuencas, pero todas son similares en términos de tipo de suelo y altura media se muestran tres escenarios, con 30, 40 y 50 mm/año, entendiendo que estos pueden ser valores mínimos, medios y máximos. Con esta información, es posible estimar caudales medios anuales entre 360 a 600 L/s que aportarían las cuencas que desembocan en la ribera oriente del Caracarani entre Humapalca y la desembocadura de la Quebrada de Colpitas, más la Quebrada de Allane.

En la Figura 73, se pueden apreciar las cuencas al oriente de Caracarani, que presentan aguas de buena calidad.

Tabla 12. Caudales medidos en terreno y estimados a partir de información del Balance Hídrico de Chile.

GPS	Nombre	Q terreno (L/s)	A (Km ²)	Q estimado 30 mm/año	Q estimado 40 mm/año	Q estimado 50 mm/año
438	Quebrada a Caracarani en SicaSica	15	31	29,5	39,3	49,2
357	Quebrada a Caracarani por Hospicio-j Caracarani	7	29	27,6	36,8	46,0
288	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-bajo	93	70	66,6	88,8	111,0
289	Quebrada a Carac oriente por Quecalani-Pahuta	198	125	118,9	158,5	198,2
339	Quebrada Allane	15	110	104,6	139,5	174,4
428	Quebrada a Colpitas antes borateras	7	5	4,8	6,3	7,9
418	Caracarani en Humapalca	250	267	254,0	414,9	423,3

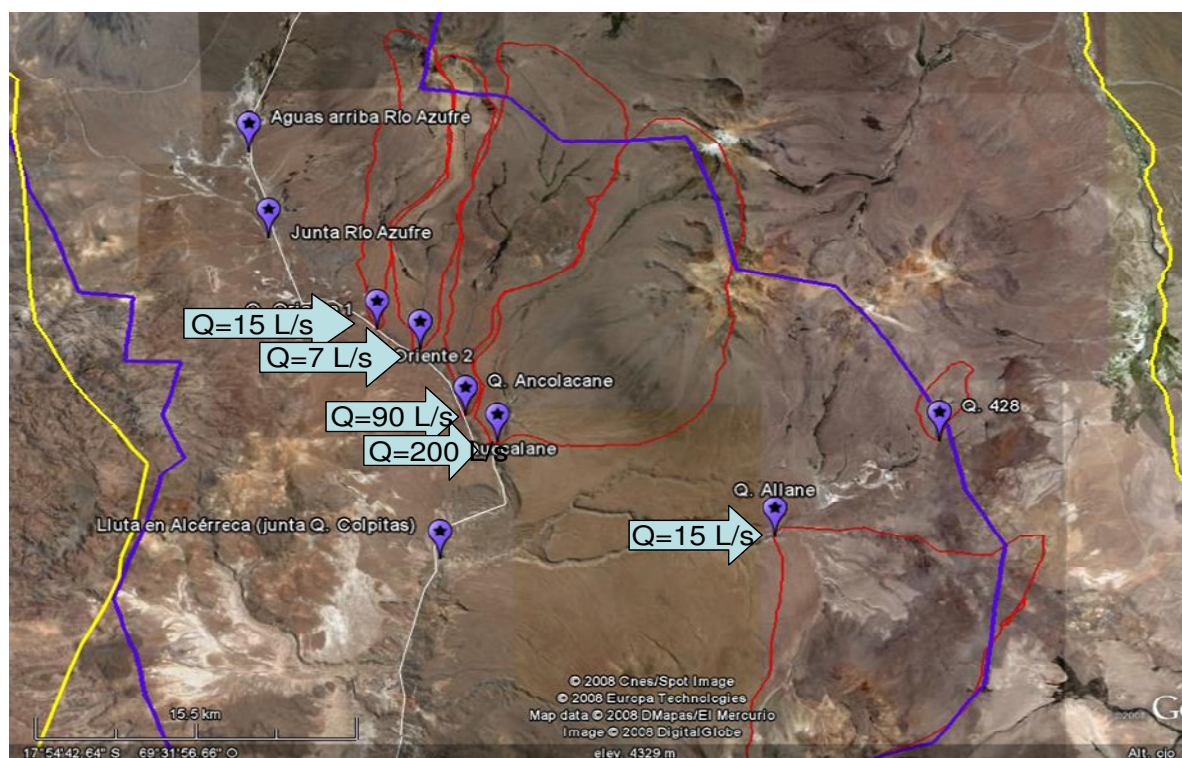


Figura 73. Cuencas menores al oriente del río Caracarani, que aportan agua de buena calidad.

Si se interceptara el agua de estas quebradas antes de incorporarse a los cauces principales con baja calidad de agua, se dispondría de aproximadamente 350 L/s de agua de excelente calidad.

Los análisis de aguas del río Caracarani en Humapalca -antes de la junta con el río Azufre- indican que la calidad del agua es aún razonable para agua de riego, con un caudal promedio de 250 L/s, concentraciones de boro promedio de 2,8 mg/L, de arsénico de 0,1 mg/L y conductividad de 1,27 mS. Si esta agua también se interceptara antes de la junta

con el río Azufre y se juntara con el agua de las otras quebradas menores se podría disponer de alrededor de 600 L/s de agua de una calidad mucho mejor para el riego que la que se usa actualmente. La Tabla 13 resume los valores aproximados de esta alternativa.

Tabla 13. Valores estimados resultantes para la mezcla del agua del Caracarani con quebradas menores.

Parámetro	Valor
Q (L/s)	600
B (mg/L)	1,40
As (mg/L)	0,05
Conductividad (mS)	0,75

8.3 Mitigación usando fuentes naturales de agua de diferentes calidades

Debido a que los afluentes del río Caracarani tienen calidades muy diversas, se puede pensar en aprovechar las características naturales de calidad del agua para producir reacciones químicas que favorezcan la remoción de los contaminantes de interés.

Una posibilidad de mitigación utilizando fuentes de aguas naturales de la cuenca es combinar las aguas del río Azufre con la quebrada de Colpitas. Las características principales de estos cauces son:

- Río Azufre tiene altas concentraciones de As -del orden de 3 mg/L-, bajo pH -en torno a 1,6- y por tanto todo el fierro presente está disuelto -aproximadamente 100 mg/L-.
- Río Colpitas tiene alto pH -en torno a 8-, concentraciones de boro del orden de 25 mg/L.

La mezcla de esta agua tendrá pH intermedio. Debido a la alta concentración de fierro disuelto y el aumento de pH, se generan precipitados de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (en rigor la estequiometría de estos óxidos hidratados es variable y depende de las condiciones de oxidación). Estos oxihidróxidos son buenos adsorbentes de arsénico por lo que una gran parte del arsénico del agua quedará sorbido a esta fase sólida. Esto ocurre naturalmente en estos momentos, en la junta del río Azufre con Caracarani y luego en Lluta en Alcérreca. Los precipitados son transportados río abajo y dependiendo de las condiciones de flujo pueden quedar depositados en zonas de aguas tranquilas y forman parte de los sedimentos. Eso se aprecia en la Figura 74, donde se observan precipitados naranjos, característicos de los hidróxidos de fierro.



Figura 74. Sedimentos recubiertos con óxidos de hierro en la estación Lluta en Tocontasi.

Bajo este esquema, si se hace esta mezcla y se favorece la formación de los precipitados de hierro, el arsénico puede ser removido en un embalse, donde estos precipitados con arsénico pueden sedimentar. Este esquema es similar al que se utiliza en el acueducto de Los Ángeles, California -Cuadro 1- (Kneebone and Hering, 2000).

En este sistema, probablemente no habría cambio en la masa de boro del agua, sólo una disminución de la concentración debido a la dilución de las aguas.

8.4 Intervención de fuentes de mala calidad

8.4.1 Descripción de alternativas

Como se mencionó anteriormente, en la cuenca del Río Lluta existen dos afluentes que aportan la mayor parte del arsénico y boro. El río Azufre proporciona arsénico y boro además de muchas sales y la quebrada de Colpitas es la que aporta el boro, también arsénico y sales disueltas. Como ambas son fuentes concentradas, parece adecuado pensar en un sistema de remoción de contaminantes en la fuente, es decir tratar directamente los ríos Azufre y Colpitas.

Para el caso del río Azufre, el tratamiento puede consistir en aumentar su pH. Este aumento de pH favorecerá la precipitación de oxihidróxidos de hierro. Como los hidróxidos de hierro adsorben arsénico, si luego de la precipitación se instala un sistema de sedimentación, los hidróxidos de hierro removerán el arsénico del agua. Adicionalmente, este aumento de pH favorecerá la precipitación de otros metales que actualmente están disueltos en el Río Azufre debido a su bajo pH, como aluminio, manganeso, zinc y plomo. Este sistema no tendría efecto importante sobre las sales que están disueltas en el agua. Es posible considerar que una fracción menor del boro pueda ser removida por la asociación con oxihidróxidos de hierro y de aluminio. La neutralización podría realizarse usando yacimientos naturales de caliza (ver Figura 75) en la zona o dosificando cal apagada más otros reactivos requeridos. Esto último probablemente tendría un costo operacional que lo haría inviable económicamente e involucraría tener una operación muy cuidadosa del sistema de tratamiento, lo que haría difícil su implementación bajo condiciones reales.

Para el caso de la quebrada de Colpitas se puede pensar en cambiar la especiación del boro, formando minerales sólidos de boro, de manera de poder removerlo por sedimentación. Un ejemplo de estos minerales es la hidroboracita, cuya precipitación/disolución está caracterizada por la siguiente reacción:



Esta reacción es favorecida para pHs básicos y para altas concentraciones de calcio/magnesio. En este caso el calcio podría obtenerse del yacimiento de caliza Humapalca (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2004) que se indica en la Figura 75. Este yacimiento consiste en un manto de caliza de hasta 1,2 m de espesor, con 92% CaCO_3 . Está ubicado cerca del río Caracarani y puede ser un yacimiento útil para neutralizar el río Azufre y para proporcionar calcio a las aguas de las borateras. Alternativamente, podría considerarse la dosificación de reactivos químicos que aumenten las actividades del calcio y magnesio, y ajusten el pH. Sin embargo, muy probablemente esta es una alternativa inviable económicamente y poco operable pues requiere de una operación cuidadosa.

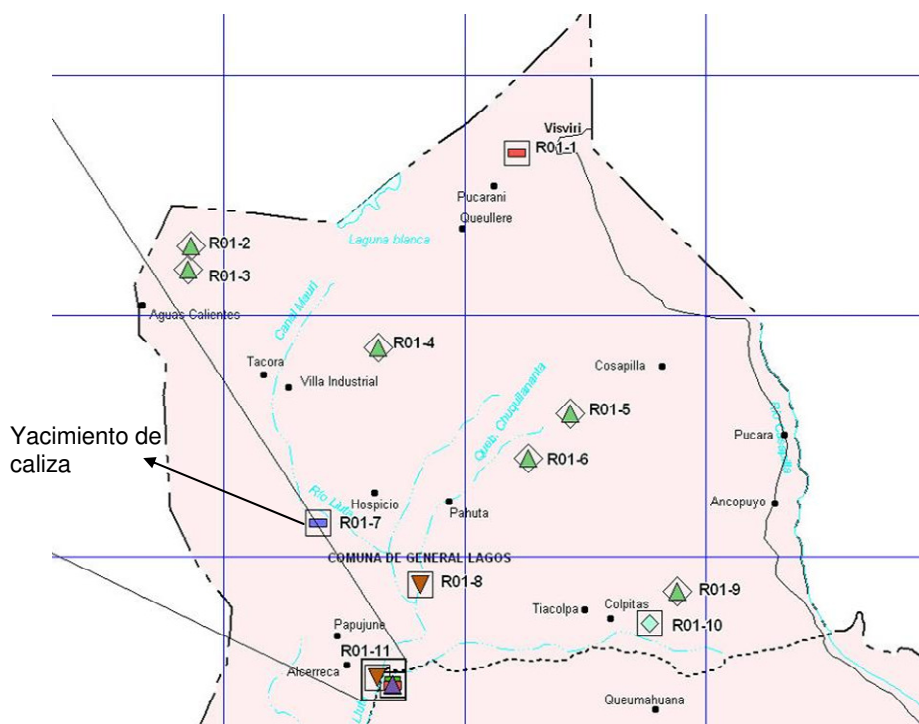


Figura 75. Ubicación del yacimiento de caliza Humapalca (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2004).

Una alternativa a la intervención por separado de las fuentes con mala calidad es combinar las aguas del río Azufre con el agua de las borateras de la quebrada de Colpitas y adicionalmente se agrega caliza (CaCO_3). Al agregar CaCO_3 al agua del río Azufre, aumentará el pH y se formarán $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y óxidos de aluminio que sorberán arsénico y una fracción menor de boro. El calcio podría ayudar a precipitar boro en las aguas provenientes del Colpitas, y mediante un tranque o sistema de sedimentación aguas abajo se podría remover los hidróxidos de fierro y aluminio -con arsénico y algo de boro sorbido- y el

mineral de boro. Hay que considerar que en esta alternativa las otras sales que provienen de estos dos cauces no serán removidas por lo que la salinidad del río Lluta permanecerá alta. También hay que considerar que los lodos de minerales de boro que se podrían formar, los óxidos de aluminio y de hierro sedimentarían. El manejo de estos lodos sería un tema de preocupación si este sistema se implementara. Al igual que en los casos anteriores el sistema requeriría de un manejo cuidadoso y probablemente involucraría el uso de insumos que haría inviable económica y operacionalmente su implementación.

Otra alternativa que se recomienda evaluar en conjunto con privados es explotar las borateras como yacimientos comerciales de boro. Según información recopilada por el equipo consultor, la empresa Quiborax sería propietaria de los yacimientos hidrotermales de las borateras. Probablemente esta empresa no los explota actualmente debido a que no le resulta rentable, puesto que utiliza el Salar de Surire como fuente de materia prima. Se propone analizar la opción de incentivar a la empresa a utilizar esta fuente, logrando así que la mayor parte de los afloramientos no lleguen al río Colpitas y por tanto al río Lluta como ocurre actualmente. Si se implementase esta medida, debe verificarse que la explotación no implique otros impactos, como posibles infiltraciones, descargas o derrames en zonas aledañas que dadas las altas concentraciones de boro podrían ser significativas en cuanto a cambios en la calidad del agua de otras fuentes.

Hace algunos años, en el Volcán Tacora existió una planta minera de extracción de azufre. Si se quiere analizar en detalle cómo afecta esta situación a la calidad del agua del río Azufre, específicamente si se debe a drenaje ácido o bien afloramiento hidrotermal, se necesitaría inspeccionar y muestrear el lugar de explotación del volcán.

La sección siguiente presenta una evaluación de la factibilidad termodinámica y experiencias preliminares de laboratorio para tratamiento físicoquímico de las fuentes de aguas de mala calidad.

8.4.2 Evaluación termodinámica

La remoción del boro mediante precipitación química podría ser considerada una alternativa si se demuestra termodinámicamente viable. A continuación se presentan las solubilidades teóricas de los principales minerales de boro en función del pH: bórax (Figura 76), colemanita (Figura 77) e hidrobóracita (Figura 78). El boro es altamente soluble, lo que se refleja en los altos valores de boro disuelto (eje Y) especialmente en el caso del bórax. En los 3 casos, el pH óptimo para lograr la precipitación es cercano a 9, puesto que se alcanza la solubilidad mínima.

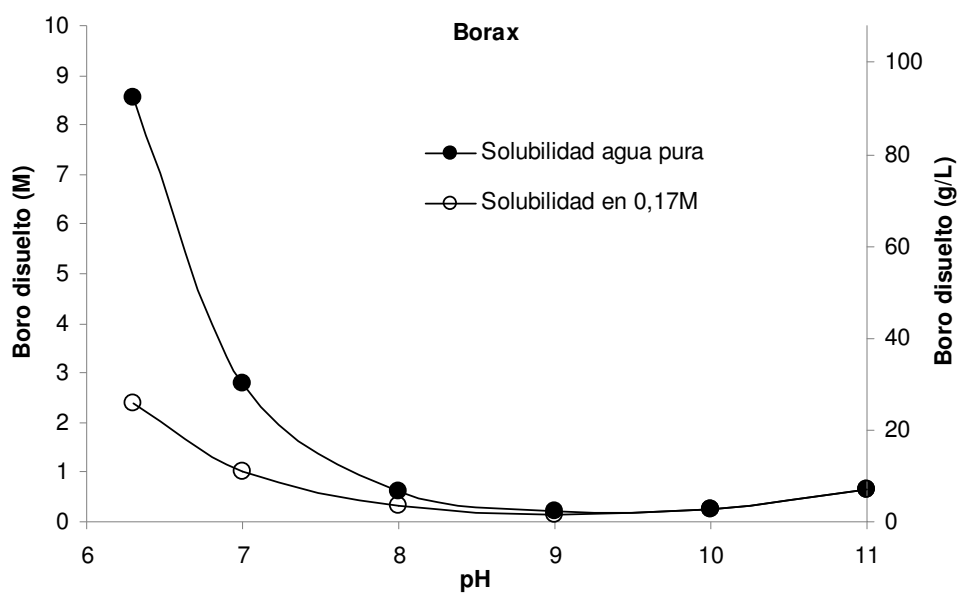


Figura 76. Solubilidad del bórax en función del pH.

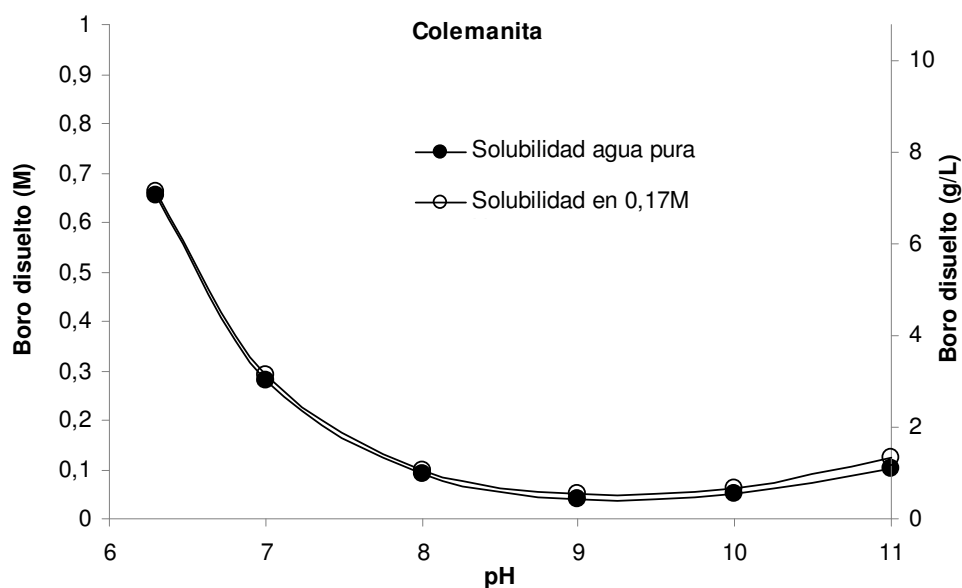


Figura 77. Solubilidad de la colemanita en función del pH.

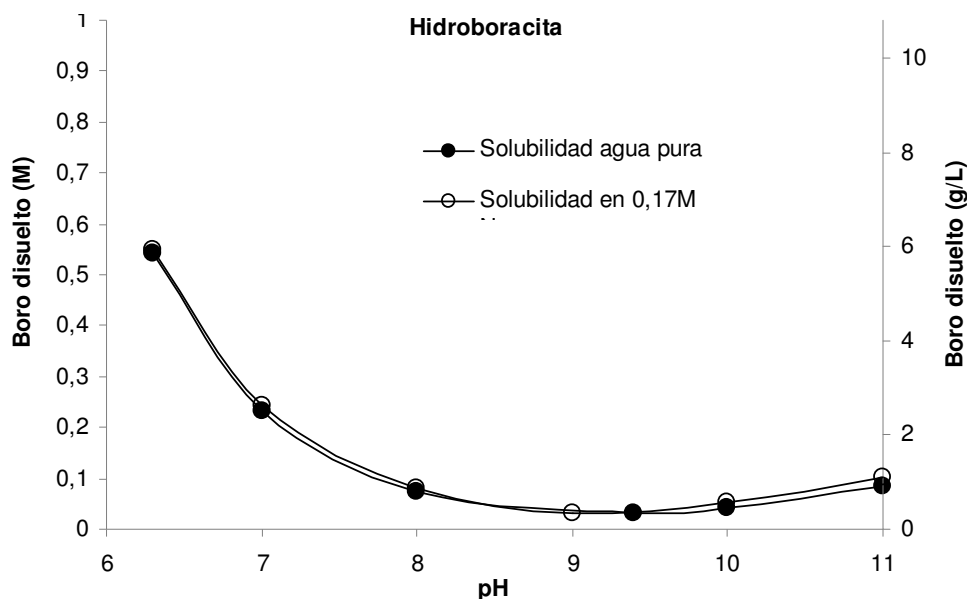


Figura 78. Solubilidad de la hidroboracita en función del pH.

Se evaluó cuantitativamente en PHREEQC mediante simulaciones de adición de carbonato de calcio CaCO_3 y cal Ca(OH)_2 al río Azufre, y de mezcla con el río Colpitas. Las principales fases que precipitan son óxidos de hierro y cuarzo. No se observó que fuera factible la precipitación de minerales de boro en ninguno de los casos, solo por efecto del control del pH. Sin embargo, debe considerarse que el aumento del pH puede producir oxihidróxidos de Fe y Al que pueden remover fracciones menores de boro.

Los resultados indican que las dosis a añadir para aumentar el pH son muy altas, del orden de los gramos por litro, como lo muestra la Figura 79. El requerimiento es mayor si se emplea CaCO_3 en vez de Ca(OH)_2 . Se muestra para efectos de comparación la dosis requerida para subir el pH a un agua pura (círculos y cuadrados sin rellenar), que resulta ser en torno a un 50% de la requerida por el agua del río Azufre.

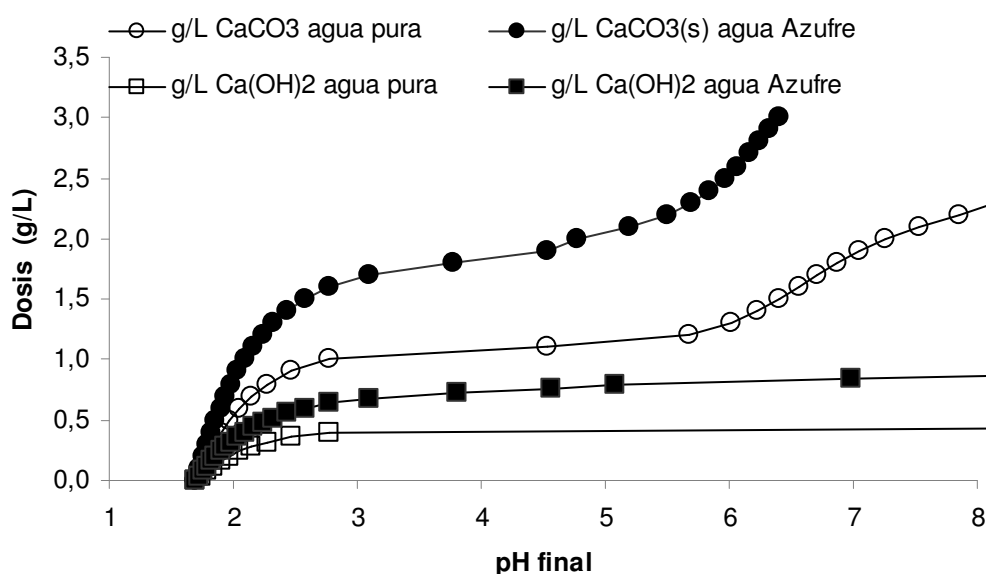


Figura 79. Dosis de cal y carbonato de calcio requerida para el aumento de pH del agua del río Azufre y agua pura.

Para la mezcla Azufre+CaCO₃, a pH 2,78 empiezan a formarse precipitados. Al llegar a pH 4,77 empieza a aumentar el número de fases precipitadas, como hidróxidos de hierro, goetita y hematita. En la sección Anexos se presenta el detalle de las fases factibles de precipitar. Para la mezcla Azufre+Ca(OH)₂, se forman aluminosilicatos como albita NaAlSi₃O₈ y minerales cálcicos y magnésicos como laumontita CaAl₂Si₄O₁₂·4H₂O. Al considerar la mezcla de 150 L/s del río Azufre con 500 L/s del río Colpitas, sin considerar la adición de reactivos se obtiene la formación sólo de minerales de sílice como cuarzo SiO₂ y de hierro como goetita FeOOH y hematita Fe₂O₃.

Se modeló en PHREEQC la precipitación de minerales de boro en agua de boratera, simulando 3 escenarios que se detallan a continuación:

Adición de CaCO₃

Se adicionó carbonato de calcio hasta una dosis de 10 g/L (0,1 M). Como lo muestra la Figura 80, no se logró que el boro precipitara, a pesar del alto valor de las dosis simuladas.

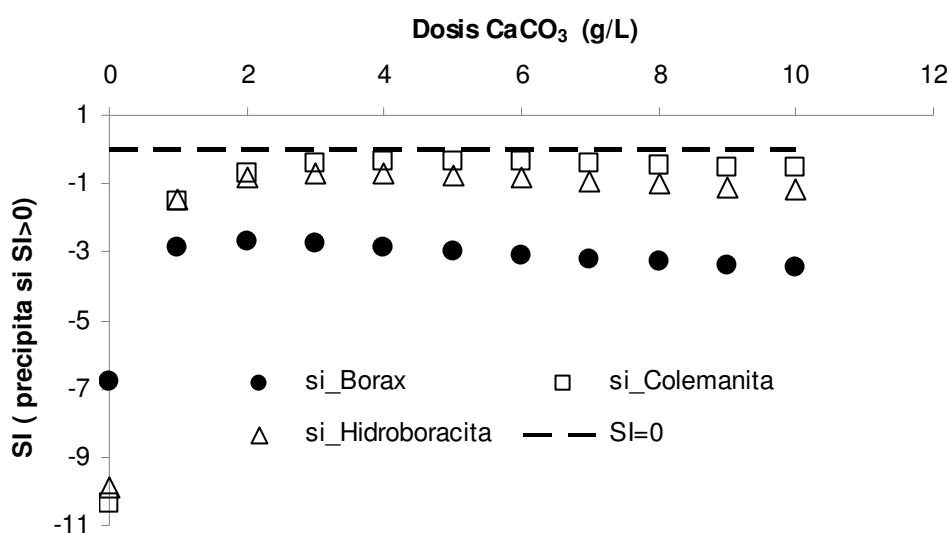


Figura 80. Índice de saturación de los minerales en función de la dosis agregada de CaCO₃ (g/L).

Adición de Ca(OH)₂

Análogamente al caso del CaCO₃, los índices de saturación de los sólidos no llegan a ser positivos (Figura 81). Nótese que las dosis agregadas de Ca(OH)₂ son un orden de magnitud menor que las empleadas en la simulación de CaCO₃, llegándose a 0,01 M (0,74 g/L).

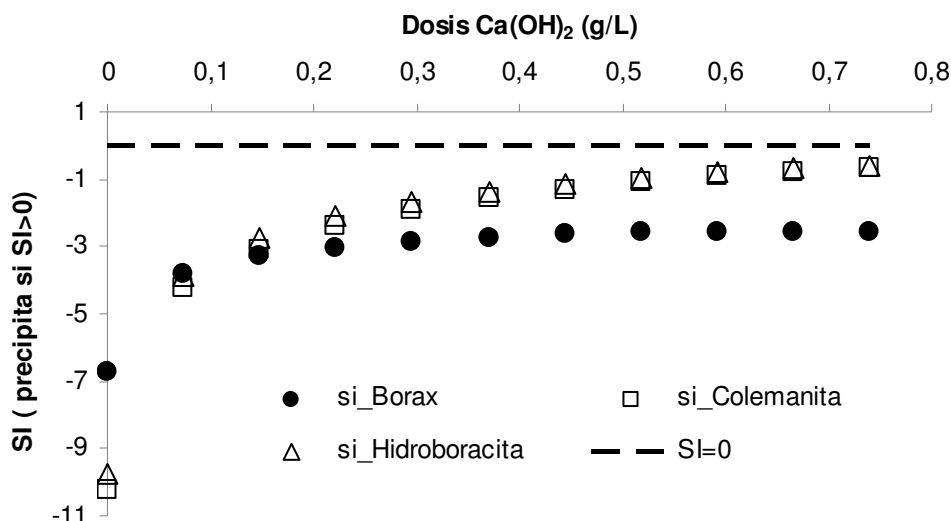


Figura 81. Índice de saturación de los minerales en función de la dosis agregada de Ca(OH)_2 (g/L).

Adición inicial de CaCO_3 más concentraciones iguales de MgCl_2 y CaCl_2

Se consideró una adición inicial de 0,06 M CaCO_3 al agua, llegándose a agregar 0,1 M de $\text{MgCl}_2 + \text{CaCl}_2$. En este caso y como lo muestra la Figura 82, sería factible la formación de hidroboracita para concentraciones entre 0,02 y 0,03 M de MgCl_2 y CaCl_2 . La colemanita y el bórax presentan índices de saturación negativos.

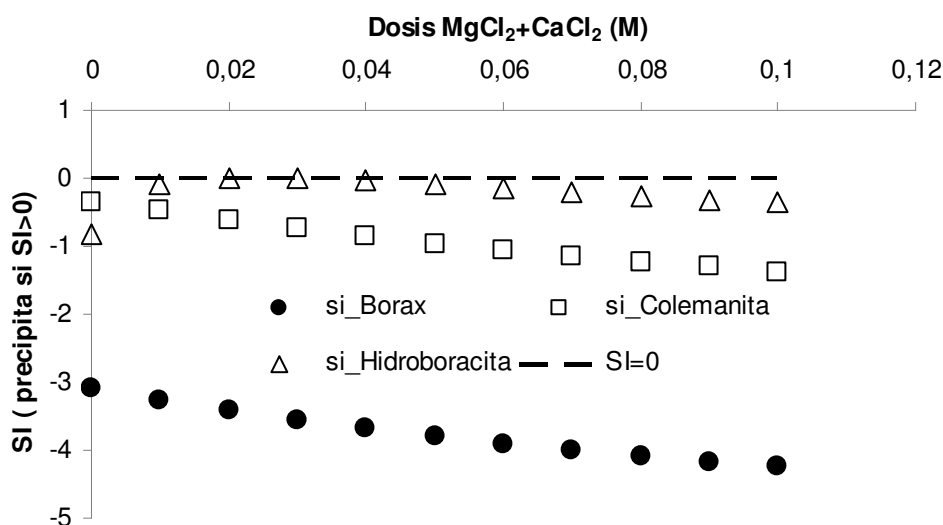


Figura 82. Índice de saturación de los minerales en función de la dosis agregada de MgCl_2 más CaCl_2 (g/L), considerando una dosis inicial de 0,06 M CaCO_3 .

En consecuencia, desde el punto de vista termodinámico no se favorece la precipitación de minerales de boro, excepto para condiciones muy extremas que aparecen poco viables económicamente. Es posible, sin embargo que se remueva una fracción menor de boro por reacciones de sorción sobre oxihidróxidos de fierro y aluminio. Sin embargo, la literatura no muestra datos confiables que permitan realizar estimaciones al respecto.

Para el caso del arsénico, aunque no se presentan cálculos termodinámicos de sorción sobre oxihidróxidos, la experiencia del consultor indica que esta es favorable termodinámicamente para los pHs y concentraciones de fierro presentes.

8.4.3 Evaluación experimental

Se realizaron experiencias de laboratorio siguiendo lo propuesto en las secciones anteriores. Se trabajó con agua de los siguientes cursos de agua:

- Río Azufre antes de junta con río Caracarani, en adelante Azufre.
- Río Colpitas antes de junta con río Caracarani, en adelante Colpitas.
- Agua de la zona identificada como “borateras”, ubicada en la quebrada Colpitas - GPS 216-, en adelante boratera.

Las experiencias se pueden dividir en 3 tipos:

- a) Adición de reactivos: CaCO_3 , Ca(OH)_2 y NaOH : con el fin de favorecer la formación de minerales de boro e hidróxidos de fierro, se probó adicionando carbonato de calcio, cal e hidróxido de sodio directamente al río Azufre, y carbonato de calcio al río Colpitas.
- b) Mezcla de ríos: se mezcló el río Colpitas con el río Azufre para aumentar el pH del este último, y así lograr que precipite el fierro y remover el arsénico mediante sorción.
- c) Adición de reactivos y mezcla de ríos: se agregó el reactivo, ya sea CaCO_3 o Ca(OH)_2 , al río Azufre y luego esta mezcla se juntó con el río Colpitas y agua de la zona de borateras. El objetivo era lograr que el calcio estuviera efectivamente disuelto en el río Azufre, antes de adicionarlo directamente a la fuente a tratar y así favorecer la formación de minerales de boro. Además, gracias al aumento de pH, se busca lograr la remoción de arsénico mediada por las partículas de fierro.

A continuación se detallan los principales resultados para cada tipo de experiencia.

a) Adición de reactivos

Colpitas + CaCO_3

Se agregó CaCO_3 al Colpitas, hasta una dosis de 3,39 g/L muestra. A pesar que no hubo cambios en el pH, lo que se explica por la alcalinidad del Colpitas (150 mg/L como CaCO_3), los resultados indican que hubo una remoción de boro del orden de 6%. Esto indicaría que se necesitaría una alta dosis de reactivo para poder lograr una mayor remoción de boro.

Azufre + CaCO_3 , Ca(OH)_2 y NaOH

Se realizó la adición de carbonato de calcio y cal al Azufre con el fin de comparar qué reactivo es más eficiente con respecto al aumento de pH, y evaluar la remoción de boro y arsénico. Se comparan las dosis de reactivo empleadas por litro de muestra para llegar a pH 6. Si se usa cal, se requieren 0,42 gramos por litro de muestra; mientras que si se usa carbonato de calcio se necesita agregar 5,6 gramos por litro de muestra. Esto puede

asociarse a que la adición de 1 g/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ equivale a 27 meq/L, mientras que la adición de 1 g/L de CaCO_3 corresponde a 20 meq/L. Además, la cal es más soluble que el carbonato de calcio, lo que facilita la disponibilidad de OH^- en solución que aumenta el pH.

Con respecto a la remoción de boro, la obtenida por la adición de cal fue menor que la atribuida al carbonato de calcio. Aunque la cal es más efectiva para aumentar el pH y por tanto se agregó en una dosis menor, la masa de calcio agregada también es menor -se adicionaron 0,22 gramos de Ca en el primer caso y 2,24 gramos de Ca en el segundo- disminuyendo así la tendencia a la formación de precipitados de boro y calcio, como la colemanita. Los resultados se pueden apreciar en la Figura 83.

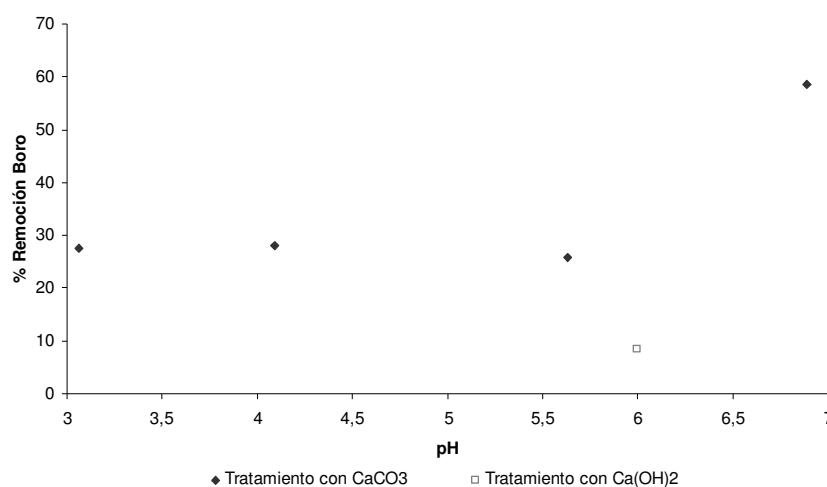


Figura 83. Remoción de boro en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al Azufre hasta pH 6.

Cabe destacar que durante el desarrollo de ambas experiencias se pudo apreciar visualmente la formación de hidróxidos de fierro, como lo indica la Figura 84. Asimismo, es posible que también se forme oxihidróxidos de aluminio, que también precipitan a pH básico. De acuerdo a la literatura, tanto los óxidos de Fe como los de Al tienen una capacidad limitada de adsorber boro. El caso contrario ocurre con el arsénico.



Figura 84. Azufre antes de tratamiento con cal -derecha- y Azufre luego de dicho tratamiento -izquierda-.

La muestra tratada presenta una coloración asociada a la formación de precipitados de fierro dado el aumento de pH, mientras que la sin tratar es cristalina.

Azufre+ CaCO_3 versus Azufre+NaOH hasta pH=7

En esta experiencia se comparó el comportamiento del carbonato de calcio versus el hidróxido de sodio, para aumentar el pH del Azufre hasta 7 y evaluar las respectivas capacidades de remoción de boro y arsénico. Si se usa NaOH, se requieren 9 gramos por litro de muestra; mientras que si se usa CaCO_3 se necesita agregar 12,3 gramos por litro de muestra. Cabe destacar que para llegar a pH 6,5 se requiere menos masa de CaCO_3 que de NaOH, pero a partir de este valor la situación se invierte.

A pesar que es más difícil llegar pH a 7 con CaCO_3 , existen ciertas diferencias en cuanto al porcentaje de remoción de boro obtenido en estas condiciones al comparar con la adición de NaOH, como lo indica la Figura 85.

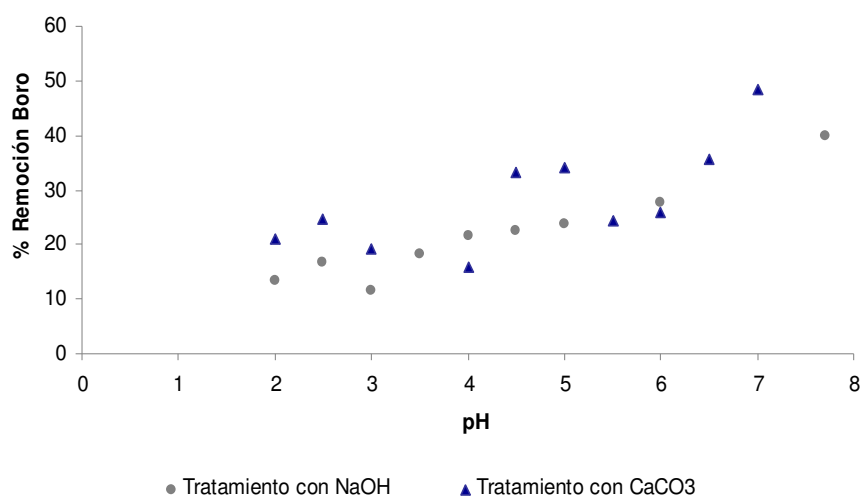


Figura 85. Remoción de boro en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y NaOH al Azufre hasta pH 7.

Como se puede ver, no hay una tendencia clara de la influencia del pH en la remoción de boro al utilizar estos reactivos. Aparentemente, con el carbonato de calcio se lograría una remoción mayor. Esto se explicaría por qué al agregar NaOH, se está aumentando el pH y agregando Na^{2+} , mientras que al agregar CaCO_3 se favorece de dos maneras la formación del mineral de boro: aumento de pH y adición de Ca^{2+} . Probablemente la precipitación de minerales de boro y sodio está limitada por cinética, además de la influencia de otras condiciones como pH y concentraciones mínimas de sodio y boro para que se forme la fase sólida.

Considerando estos resultados, lo recomendable sería aumentar el pH con CaCO_3 sólo si se requiere un mayor porcentaje de remoción de boro. De lo contrario, se sugiere utilizar NaOH ya que se requiere una dosis menor, obteniéndose remociones del mismo orden, aunque levemente inferiores.

Con respecto a la remoción de arsénico, la Figura 86 muestra la remoción obtenida en función del pH. Los resultados son prácticamente iguales para ambos reactivos, alcanzándose prácticamente el 100% de remoción de arsénico.

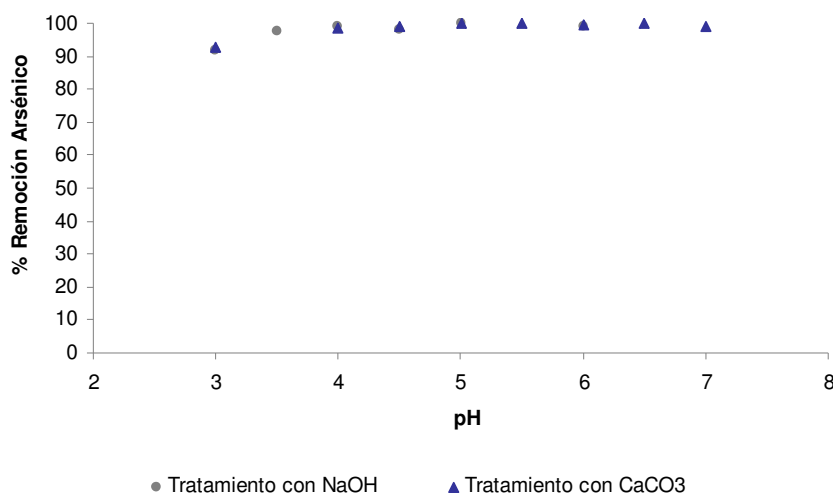


Figura 86. Remoción de arsénico en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y NaOH al Azufre hasta pH 7.

Como se ha mencionado en este estudio, el arsénico y el fierro se encuentran correlacionados, lo cual se confirma con los resultados presentados en la Figura 87. Las curvas de remoción son bastantes similares, lo que indica que el arsénico efectivamente se está removiendo gracias a la formación de hidróxidos de fierro.

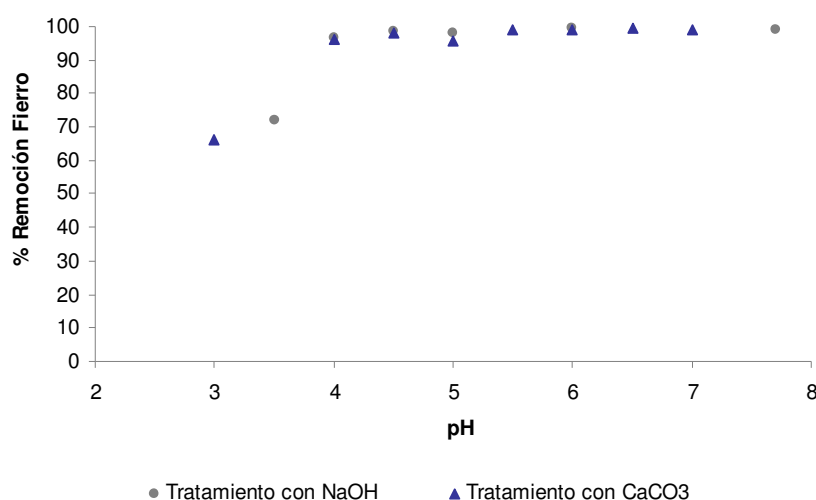


Figura 87. Remoción de hierro en función del pH, producto de la adición de CaCO_3 y NaOH al Azufre hasta pH 7.

Los resultados obtenidos muestran que es factible remover boro y arsénico del río Azufre empleando CaCO_3 y/o NaOH . Sin embargo, se debe considerar que las dosis empleadas a nivel de laboratorio son una estimación de un posible tratamiento directo al río, lo cual implicaría el manejo de volúmenes mayores de agua a tratar.

b) Mezcla de ríos

Azufre + Colpitas

Se agregó agua del Colpitas al Azufre, hasta llegar a pH 7 y 8. Para esto, se requirió una dosis de 24 mL Colpitas/mL Azufre y de 35,4 mL Colpitas/mL Azufre respectivamente. Cabe destacar que el pH inicial del Azufre es de 1,6, por lo que independiente del método, resulta difícil provocar un aumento de pH en ese rango debido a la alta intensidad de buffer para $\text{pH} < 4$. Los resultados obtenidos indican que la disminución en la concentración de boro se atribuye totalmente al efecto de dilución, lo cual ocurre en los 2 casos. Como ya se mencionó, no hay referencias en cuanto a la capacidad de sorción de boro para los hidróxidos de hierro, por lo que lo obtenido está dentro de lo esperado.

Con respecto a los hidróxidos de hierro y la remoción de arsénico, se alcanzó una remoción de 37% para el arsénico y de 99% para el hierro a pH 8. Es decir, esta medida podría implementarse eventualmente para remover estos compuestos, sin embargo se debe considerar que se necesitaría mucho volumen del río Colpitas para neutralizar el Azufre, lo cual difícilmente podría implementarse en la práctica.

c) Adición de reactivos + mezcla de ríos

Azufre + $\text{CaCO}_3/\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasta $\text{pH}=6$ + boratera/Colpitas

Se agregó CaCO_3 al Azufre, con el fin de aumentar el pH hasta 6, para luego mezclar con agua de boratera o con el río Colpitas según el caso. Se presentan los resultados para la experiencia Azufre + CaCO_3 , con boratera, puesto que para Azufre + CaCO_3 con Colpitas y Azufre + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con boratera, a pesar que fue posible aumentar el pH, no fue factible

obtener resultados consistentes de remoción. Teóricamente, debería haber una remoción más significativa para las experiencias con boratera, debido a la elevada concentración de boro presente en la fase acuosa los que favorece la formación de sólidos boratados como la colemanita.

Azufre + CaCO_3 , con boratera hasta $\text{pH}=7$

Se agregó agua de boratera a la mezcla del Azufre+ CaCO_3 hasta llegar a pH 7, para lo cual se requirió una dosis de 0,6 mL agua boratera/mL Azufre+ CaCO_3 . La remoción de boro obtenida bordeó el 6%.

Azufre + CaCO_3 con boratera hasta $\text{pH}=8$

Se agregó agua de la boratera a la mezcla del Azufre+ CaCO_3 hasta llegar a pH 8. En este caso, la dosis requerida fue de 2,85 mL boratera/ mL Azufre+ CaCO_3 . La remoción de boro obtenida alcanzó el 10%.

Estos resultados indican que probablemente si se agregara una mayor dosis de agua de boratera, la remoción aumentaría, debido al aumento de pH y de masa de boro disuelto. Estos factores, como se mencionó, favorecen la formación de colemanita; pasando así el boro de fase acuosa a fase sólida.

En la literatura se pueden encontrar referencias con respecto al uso de métodos similares para remoción de boro en agua de riego (Dionisiou et al., 2006). La magnesia (MgO) utilizada se probó para concentraciones iniciales que fluctuaron entre 3 y 100 mg/L, obteniéndose remociones entre 50 y 100% según la relación entre la masa de boro y la masa de magnesia usada. También se recomienda el uso de Ca(OH)_2 el cual se ha demostrado es efectivo para disminuir la concentración de boro (Jamis et al., 2002). Estos antecedentes son una buena referencia a la luz de las medidas examinadas de este estudio, sin embargo se requiere validar los resultados de las pruebas preliminares evaluando aspectos específicos relevantes por ejemplo si hay interferencia con otras especies presentes en los cursos de agua, limitaciones de cinética -el tiempo que tardan los procesos fisicoquímicos en ocurrir-, influencia de la masa total de contaminantes involucrada, reactivos a utilizar, etc. Una vez conocido con mayor profundidad el funcionamiento fisicoquímico del sistema bajo distintas condiciones y si se considera que sus resultados son prometedores, se requeriría evaluar otros aspectos, por ejemplo encontrar las condiciones óptimas de operación como volumen o caudal a tratar, dosis de reactivos, además de considerar la cantidad de residuos a generar y su correspondiente disposición.

9. Impacto de un embalse en el río Lluta

Debido a los problemas de crecidas y arrastre de sedimentos, junto con los problemas de disponibilidad de recursos hídricos que aquejan a la zona del Valle del Lluta, se planteó la posibilidad de construir un embalse en el río. La Dirección de Obras Hidráulicas solicitó a la consultora Ingendesa un estudio de factibilidad para la construcción de la obra (Dirección de Obras Hidráulicas, 2004). Las principales características del embalse propuesto en el estudio son:

- Volumen del embalse 17 millones de m^3
- Altura de la presa 76,5 m

- Costo de 24,9 millones de US\$
- Ubicado en el sector de Chironta, aproximadamente 14 km aguas arriba de la estación Lluta en Tocontasi

Se debe destacar que dadas las características de la zona, el contar con un manejo adecuado para disponer de los recursos hídricos para el riego por ejemplo mediante un embalse puede hacer que esta opción sea atractiva. Debido a esto, el enfoque que se le ha dado a este proyecto hasta ahora es el de regular las crecidas y asegurar un volumen de agua destinada a riego, sin considerar la calidad del agua a embalsar y por tanto los posibles impactos aguas abajo del río. En este contexto y dada la información recopilada en este estudio en cuanto a los contaminantes del río, las principales consecuencias de contar con un embalse en esa zona son las mencionadas a continuación, y detalladas en el presente punto:

- Lodos arsenicados
- Cambios en la calidad del agua
- Calidad natural del agua

9.1 Lodos arsenicados

Como se explicó en el punto 6.1, la geoquímica del río Lluta está fuertemente influenciada por la presencia de arsénico aportado principalmente por el río Azufre. En este curso se encuentra mayormente en la fase acuosa, pero hacia aguas abajo -en el río Lluta- se encuentra mayormente en la fase sólida, es decir asociado a partículas. Así, el embalse funcionaría como un sedimentador, donde se acumularían estos sólidos arsenicados.

Los gráficos de la Figura 88 y Figura 89 muestran cómo aumenta la masa de arsénico acumulada en el embalse al cabo de 5 años, para distintas concentraciones de arsénico total en el agua; y considerando que el 90% del arsénico total se encuentra en la fase sólida.

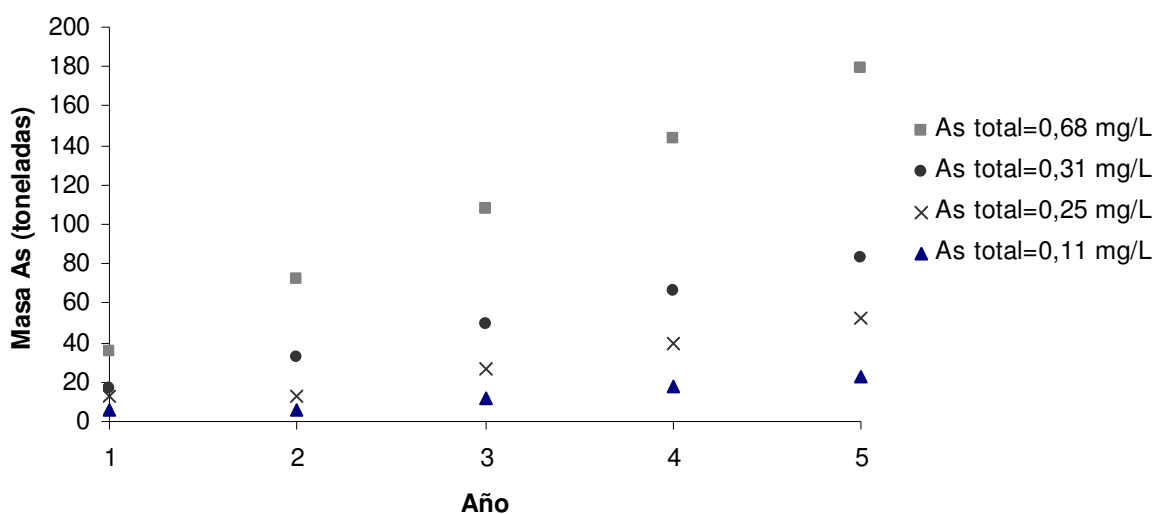


Figura 88. Acumulación de arsénico en los sedimentos depositados en el embalse al cabo de 5 años, considerando distintas concentraciones de As total en el río Lluta.

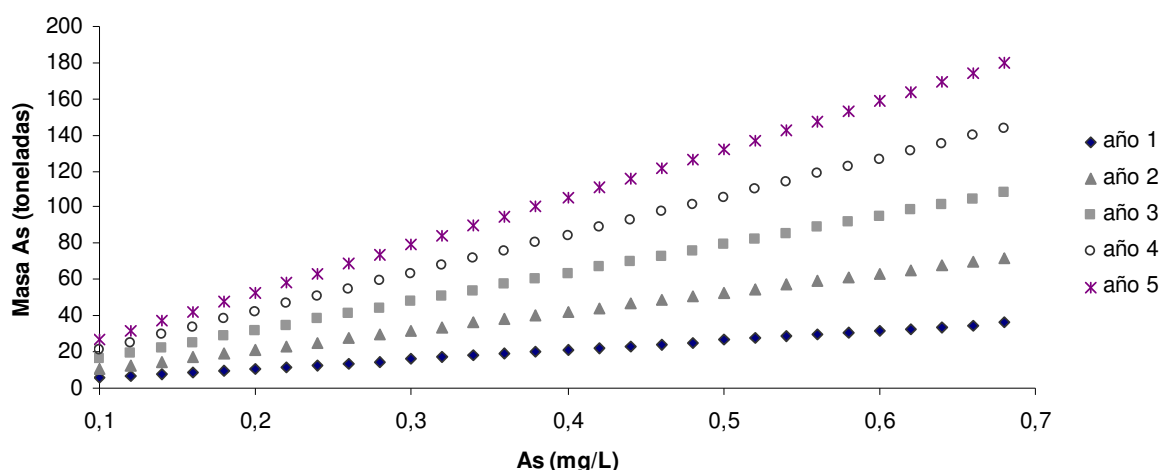


Figura 89. Acumulación de arsénico en los sedimentos depositados en el embalse, en función de la concentración de As total en el río Lluta, considerando un horizonte de 5 años.

Las concentraciones históricas de la DGA indican un mínimo de 0,11 mg/L, un promedio de 0,31 mg/L y un máximo de 0,68 mg/L As total. Para estas condiciones, y considerando el caudal medio anual de 1,86 m³/s en Lluta en Alcérreca (Dirección General de Aguas, 1987), la masa de arsénico depositada en el fondo del embalse al cabo de 5 años sería de 29; 82,9 y 179,5 toneladas, respectivamente. Si se considera el promedio de 0,25 mg/L reportado por este estudio, la masa de arsénico correspondería a 66 toneladas.

Como puede verse, se está hablando de masas considerables de arsénico. El principal riesgo de la presencia de estas partículas es su eventual resuspensión ocasionada por ejemplo por una crecida. Si se decidiera construir el embalse, sería necesario retirar los lodos acumulados y disponer de ellos adecuadamente, como se hace en las plantas de tratamiento de agua potable. El estudio considera que el volumen de sedimentos corresponde a 5 millones de m³, y que el volumen anual de sedimentos total afluente al embalse en la zona del Lluta bajo Socoroma puede variar entre 135.501 y 512.407 m³ según el escenario (Dirección de Obras Hidráulicas, 2004). Cabe destacar que el diseño del embalse considera control de crecidas y sedimentos asociados a las precipitaciones estivales, y aunque se hace referencia a la mala calidad del agua principalmente por la salinidad y el contenido de boro, no se menciona el problema del arsénico ni su potencial presencia en los sedimentos.

Se han realizado investigaciones en sistemas similares para estudiar el comportamiento del arsénico en sedimentos y así evaluar una eventual liberación a la fase acuosa (Kneebone and Hering, 2000). Por ejemplo, el sistema del acueducto de Los Ángeles (Kneebone et al., 2002) presentado en el Cuadro 1 cuenta con el lago Crowley como primer embalse. El flujo másico de arsénico en el lago Crowley es de 15 toneladas al año aproximadamente, bastante similar a las 13 toneladas que ingresarían al Embalse Chironta según las estimaciones de este estudio. Las concentraciones de arsénico en sedimentos reportadas por los autores son de 140 ppm en los sedimentos de la cuenca, y de 260 ppm en el sitio de la presa. Este estudio reporta que aparentemente el arsénico está inmovilizado en los

sedimentos por fases de sulfuros, por lo que en principio no es una amenaza a la calidad del agua del acueducto.

Una reciente investigación entrega evidencia de la acumulación de arsénico, cobre y fierro en el embalse Puclaro, ubicado en el curso medio del río Elqui en la Región de Coquimbo (Galleguillos et al., 2008). Este embalse fue construido con el fin de aumentar la seguridad del riego agrícola de la cuenca. Sin embargo, se convirtió en un inesperado pero efectivo sedimentador. El análisis de la información de calidad de agua de las estaciones de monitoreo de la DGA en la zona de interés indica que de forma natural la diferencia entre las concentraciones de los metales aguas arriba y aguas abajo del embalse era de 40%. Los autores atribuyen este efecto a la incorporación de estos metales a material sedimentario, hidróxidos de fierro en el caso del arsénico o a materia orgánica. Luego de la operación del embalse, esta diferencia aumentó a un 90%, información consistente con otro estudio de uno de los autores. Se espera que al final de la vida útil de la obra (100 años), el material particulado impida la operación de la torre de toma de las aguas. Los autores recomiendan considerar la información obtenida de este estudio para evaluar los impactos de posibles intervenciones en sistemas similares, por ejemplo la eventual acumulación de sedimentos arsenicados en el embalse Chironta en este caso.

9.2 Cambios en la calidad del agua a embalsar

Si llegasen a ocurrir cambios en la calidad del agua que está entrando al embalse y/o de la ya embalsada, la especiación del arsénico podría verse afectada. Se mencionan los principales factores controladores de la especiación del As y los posibles efectos.

pH

El pH es el principal parámetro regulador de la especiación del arsénico. A pH bajo, el arsénico se encuentra disuelto en el agua; mientras que a pH alto éste se encuentra mayormente particulado. Si por algún efecto aguas arriba, el pH del agua que está entrando al embalse disminuyera, el arsénico pasaría de la fase sólida a la fase acuosa, y por lo tanto podría llegar disuelto hacia agua abajo.

Fierro

El fierro en el río Lluta se encuentra mayormente como oxihidróxidos que asocian el arsénico. Si disminuyera el fierro particulado, ya sea por una disminución del fierro total y/o por que el pH bajó, la disolución de estas partículas conllevaría la liberación del arsénico a la fase acuosa.

Los parámetros pH, Fe y As están altamente relacionados; por lo que se debe ser cuidadoso en cuanto a las condiciones que afecten la variación de ellos.

Condiciones anóxicas

Es probable que durante su operación, en el fondo del embalse se generen condiciones anóxicas bajo condiciones naturales de carga orgánica o eventualmente por causas

antrópicas. Esto favorecería el establecimiento de un ambiente reductor y carente de oxígeno, causando que el hierro presente como oxihidróxidos (fase sólida) -que tiene inmovilizado el arsénico sobre sus superficies- se reduzca a hierro soluble, liberando el arsénico a la fase acuosa, y generando una descarga de arsénico hacia aguas abajo. Dependiendo de las características específicas de este escenario, el arsenato (As(V)) presente en los sedimentos se podría incluso reducir a arsenito (As(III)), una especie mucho más tóxica y difícil de remover. Junto al arsénico se movilizarían hacia aguas abajo también los otros metales acumulados sobre la superficie de los oxihidróxidos. Una vez incorporados al caudal del Lluta se produciría reaireación y se generaría oxihidróxidos que posiblemente asociarían nuevamente el arsénico, generando depósitos sobre los sedimentos del río. Es posible que estos depósitos sean mayores en cantidad respecto a los que eventualmente ocurren en el río debido a que la masa liberada por evento podría ser mayor.

Resuspensión de sedimentos

La acumulación de sedimentos ricos en hierro, arsénico y otros metales naturalmente hará que cualquier evento natural o intervención humana que resuspenda estos sedimentos hará que se liberen y distribuyan hacia aguas abajo, en concentraciones probablemente mayores a las que se observan ahora. Actualmente estos sedimentos fluyen constantemente por el río, mientras que la presencia del embalse los podría movilizar en eventos discretos, aumentando la concentración por evento.

9.3 Calidad natural del agua

El estudio del embalse (Dirección de Obras Hidráulicas, 2004) considera volumen de agua y no calidad, y por lo tanto no hay recomendaciones con respecto a este tema. El agua a embalsar tendría una calidad similar a la del río en esa zona: alta salinidad y contenido de boro. Según lo recopilado en este estudio, el efecto de las crecidas es bastante puntual, y por tanto la calidad de esta agua no difiere demasiado de la calidad natural del río. En cuanto al boro, cabe destacar que su reactividad es muy baja y se encuentra principalmente en la fase acuosa como B(OH)_3 , y por tanto su especiación sería similar tanto en el río como en el agua embalsada. Por lo tanto, el efecto neto del embalse en el río tendrá un impacto muy menor sobre la concentración promedio de boro, pero sí significará una reducción de la concentración de arsénico. También tendrá un efecto de control de crecidas y de tamponamiento de los cambios de concentraciones y pH hacia aguas abajo. Es conocido que en el río ocurren eventos puntuales de cambios bruscos de la conductividad, concentraciones de iones y pH. Estos cambios serán modulados por la dilución en el volumen del embalse. El resultado será que el agua que saldrá del embalse siempre tendrá una calidad similar a la del promedio anual del río Lluta.

Con el fin de estimar la calidad del agua en cuanto a salinidad que podría almacenarse en el embalse, se analizó la disponibilidad de agua con distintas conductividades según información reportada en la estación Lluta en Alcérreca en los 2 últimos años, usando los valores de caudal medio diario y conductividad media diaria. Los datos de conductividad se registraron en la sonda multiparamétrica ubicada en la estación, y fueron corregidos por un factor de 1,43 según las mediciones de terreno realizadas por el equipo consultor en el mismo punto debido a que las mediciones de dicha estación subestiman el valor de la conductividad.

Se clasificó la calidad según el valor reportado y corregido de la conductividad:

- Buena calidad: Conductividad inferior a 750 μS .
- Regular calidad: Conductividad entre 750 y 1.500 μS .
- Mala calidad: Conductividad superior a 1.500 μS .

La Figura 90 muestra la evolución temporal de la conductividad media observada en Lluta en Alcérreca. La conductividad promedio del período equivale a 1.833 μS , con un mínimo de 1.051 μS y un máximo de 3.622 μS .



Figura 90. Variación temporal de la conductividad media diaria, estación Lluta en Alcérreca.

La Figura 91 muestra la evolución temporal del caudal medio registrado en Lluta en Alcérreca. Se registró un mínimo de 0,68 m^3/s y un máximo de 23,55 m^3/s , con un promedio de 2,23 m^3/s .

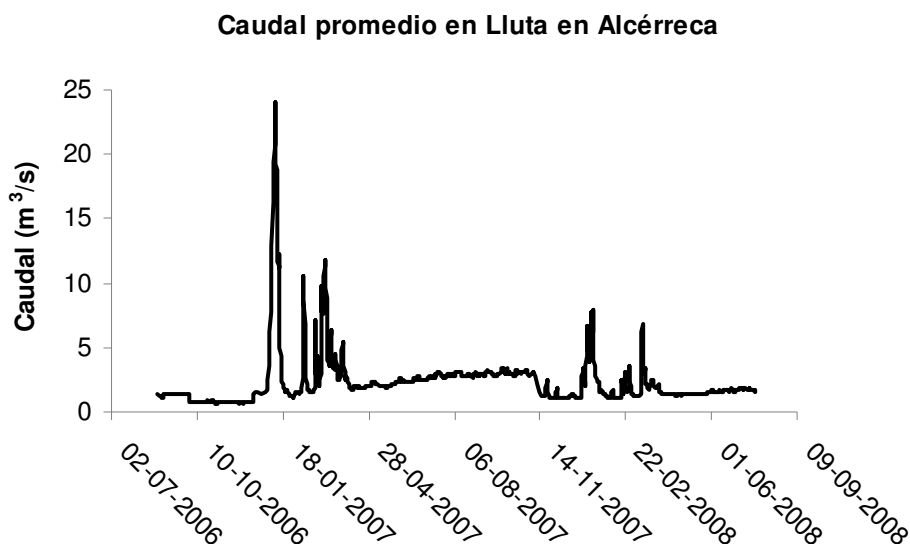


Figura 91. Variación temporal del caudal medio diario, estación Lluta en Alcérreca.

La Figura 92 presenta la curva de frecuencia acumulada para la conductividad observada en Lluta en Alcérreca.

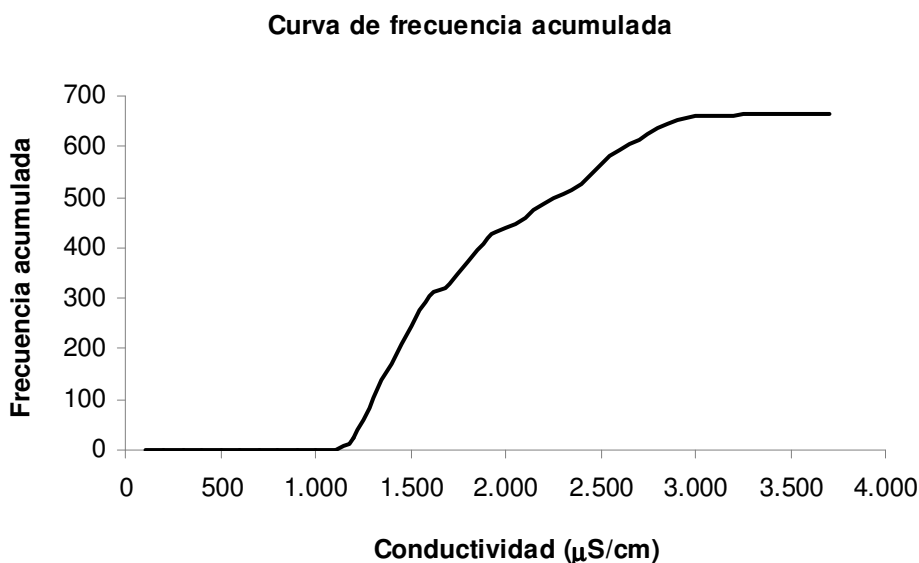


Figura 92. Frecuencia acumulada para el valor de la conductividad, estación Lluta en Alcérreca.

Se agruparon aquellos períodos de tiempo en que se reportó agua de la misma calidad. Se obtuvo que entre el 24/08/06 y el 23/07/08 el volumen de agua disponible total corresponde a $1,24 \times 10^{10} \text{ m}^3$, de los cuales un 39,7% -es decir $4,93 \times 10^9 \text{ m}^3$ - se calificaron como de mala calidad. El restante 60,3%, que corresponde a $7,51 \times 10^9 \text{ m}^3$, corresponde a regular calidad, es decir no se registró agua de buena calidad en dicho período. Se recomienda tomar en cuenta esta información para considerar la calidad del agua con que se contaría en el caso de almacenarla en un embalse.

La Figura 93 muestra en el eje Y el caudal promedio diario (m^3/s) que resultó tener una conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) igual o inferior a la presentada en el eje X.

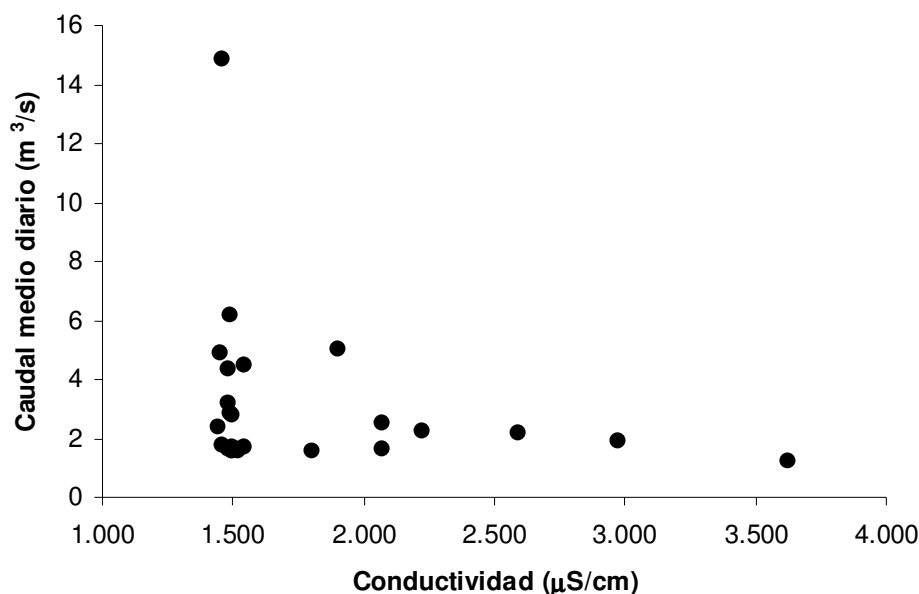


Figura 93. Caudal medio diario que posee una conductividad igual o menor, estación Lluta en Alcérreca.

Puede verse que para los mayores caudales observados, la calidad del agua resulta ser regular (conductividad entre 750 y 1.500 μS) y que los mayores valores de conductividad (mala calidad) se presentan para caudales bajos. Sin embargo, también se observan caudales bajos con calidad regular. Esta situación indica que no se podría estimar a priori la calidad del curso sólo considerando su caudal medio diario.

Como ya se ha mencionado, la conductividad del río va aumentando hacia aguas abajo. Los valores medidos por el equipo consultor en Lluta en Alcérreca son bastante similares a los que se pudo medir en los vadeos Vinto y Arancha, el primero ubicado muy cerca de la ubicación propuesta para el embalse. Sin embargo ya en la estación Lluta en Tocontasi se reportó una disminución en los valores medidos, probablemente debido a los cultivos presentes aguas arriba. Por esto, se podría considerar como representativa la conductividad en Lluta en Alcérreca para estimar la conductividad que tendría el río en el sector de Chironta, donde se ubicaría el embalse.

A continuación se resumen las principales ventajas y desventajas de contar con un embalse en la zona de Chironta.

Ventajas:

- Aseguramiento del caudal disponible para regadío.
- Drenaje mejorado debido a la modificación del patrón de agua subterránea.
- Regulación de crecidas ocasionadas por las lluvias altiplánicas.
- Control del pH y de otras características químicas.

Desventajas:

- Depositación de sedimentos arsenicados y su consecuente riesgo.
- Intervención considerable del ambiente, no reversible.
- Costo elevado.
- Calidad del agua permanece similar a la actual.

10. Conclusiones

La calidad del río Lluta y de sus afluentes principales -Río Colpitas y Río Azufre- tiene diferentes problemas por el pH, alta salinidad y altas concentraciones de arsénico y boro. Estos se atribuyen a características geológicas de la cuenca, principalmente asociadas al Volcán Tacora que aporta metales, sales y acidez al río Azufre; y a los afloramientos hidrotermales -denominados “borateras”- ubicados en la Quebrada de Colpitas y que aportan mayormente boro, arsénico y iones. La presencia de estos contaminantes varía en magnitud, dependiendo del cauce, pero en general es permanente y con pocas variaciones durante el año.

Los análisis químicos han permitido identificar y cuantificar las variaciones de arsénico y boro en el río Azufre y en las borateras en quebrada Colpitas, en la parte alta de la cuenca. En el primer caso, las concentraciones de boro prácticamente no varían de 30 mg/L y para el arsénico se encuentran en torno a 3,5 mg/L; mientras que en el segundo se han reportado concentraciones de boro entre 350 y 400 mg/L y entre 8 y 15 mg/L As para distintos afloramientos. Esta es la principal causa que el río Lluta presente en la estación Lluta en Panamericana concentraciones de boro del orden de 20 y 0,1 mg/L respectivamente, y conductividades del orden de 2 mS. Por otro lado, en la parte baja de la cuenca, se ha observado el aumento de la conductividad, boro y pH hacia aguas abajo. Presumiblemente existe un fenómeno de concentración, debido a la evaporación superficial sumada a la evapotranspiración asociada a los cultivos. Esto se va verificado gracias a la información recopilada en terreno. También posiblemente existe un intercambio con el flujo subterráneo que posibilita la recuperación del agua infiltrada aguas arriba.

Cabe destacar que se ha encontrado evidencia de lo acotado del efecto de dilución de las precipitaciones estivales. Si bien es cierto se identifica una disminución del contenido de sales asociados a las precipitaciones, este efecto es localizado temporalmente. Por ejemplo, se observó que durante la temporada de invierno altiplánico se encuentran altas concentraciones de boro, incluso luego de una semana completa de lluvias, por lo que este efecto no soluciona la mala calidad del río Lluta. Es más, sedimentos arsenicados y otros sólidos pueden ser arrastrados por las lluvias, desembocando finalmente en el río.

En base a la información recolectada, la construcción de un embalse en la zona de Chironta en el río Lluta no parece una alternativa adecuada para disponer de agua para riego. El agua que se embalsaría tendría una calidad equivalente a la del río actualmente. Además, este embalse sería un depósito de sedimentos, muchos de ellos con altas concentraciones de arsénico, que eventualmente podría liberarse al río si no existe una adecuada disposición de los lodos. Por otra parte, debido a lo localizado del efecto de las precipitaciones, tampoco parece útil tratar de recolectar las aguas en eventos de crecida puesto que la

calidad del agua del río no mejora sustancialmente. Debe considerarse esta información si se decide llevar a cabo el proyecto del embalse, con el fin de minimizar el riesgo a la exposición de As. Sin embargo, el embalse tendría un efecto de regulación de crecidas y de tamponamiento de concentración de especies disueltas y pH, lo que actualmente no ocurre.

Se han identificado quebradas de calidad superior a los cursos principales: baja conductividad, bajo arsénico y menos boro que desembocan al río Caracarani desde el oriente -e.g. Ancolacane- y que aparecen como recursos de muy buena calidad, con caudales del orden de 350 L/s. También se ha identificado que la Quebrada Allane y otras quebradas menores ubicadas en la Quebrada Colpitas (al norte de las borateras) tienen una calidad similar, junto con la Quebrada Aroma.

En perspectiva de la caracterización de calidad del agua de la cuenca del río Lluta, la alternativa de gestión que parece más conveniente es aprovechar los pocos recursos de buena calidad que existe en la zona alta de la cuenca. Es así como las quebradas que descargan en la ribera oriente del río Caracarani entre Humapalca y Colpitas -Quebrada a Caracarani en SicaSica, Quebrada a Caracarani oriente por Hospicio, Quebrada a Caracarani oriente por Ancolacane, Quebrada a Caracarani oriente por Quecalani-Pahuta- y Quebrada Allane antes de juntarse con Colpitas son recursos de agua de buena calidad. Adicionalmente, las quebradas aguas arriba de las borateras de Colpitas también son recursos de buena calidad. Obras que interceptaran estos recursos antes de descargar al río Caracarani parecen una alternativa conveniente. En este mismo sentido, también se puede pensar en recuperar aguas de la zona más alta de la cuenca, sobre Humapalca y conducir las en forma independiente, es decir considerar estas quebradas al oriente de Caracarani junto con dicho río (antes de la junta con el Azufre), puesto que así se contaría con 600 L/s aproximadamente de agua de calidad para riego.

Para evaluar esta alternativa se hace necesario profundizar en el conocimiento de las variaciones de caudal y calidad estacional con una mayor precisión, así como estudiar otras fuentes menores que también se pudieran recuperar. Junto con esto, es fundamental conocer el impacto que esto tendrá sobre poblaciones que usan el agua de estas quebradas, por ejemplo las localidades de Ancolacane, Chuquiananta, Quecalani y Cascavillani. Inicialmente, si el agua que se recupera es aguas abajo de los poblados, no debiera haber impactos.

Por último, además de la alternativa de utilizar solamente aguas de buena calidad, se plantea la posibilidad de generar sistemas de mitigación de contaminantes en la fuente. Como las principales fuentes naturales de arsénico y boro son el río Azufre y la quebrada de Colpitas, existirían alternativas para combinar las aguas de estos dos cursos y generar reacciones químicas donde se favorece la precipitación de hidróxidos de fierro que sorben arsénico y de precipitados minerales que contienen boro. Mediante un embalse donde pueda ocurrir la sedimentación, estos contaminantes pueden ser removidos. Ensayos preliminares de laboratorio indican que esto es factible. Si esta alternativa se evalúa posteriormente, es necesario considerar la gestión de los residuos sólidos que se producirá y considerar que otros iones presentes en el agua no se removerán, por lo que la salinidad del agua no cambiará significativamente.

11. Bibliografía

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, A. W. W. A., & WATER ENVIRONMENT FEDERATION, (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition.*
2. ANOVITZ, L. M. & GREW, E. S. (1996) Mineralogy, petrology and geochemistry of boron: An introduction. *Boron*, 33, 1-40.
3. AQUA TECHNOLOGY WATER STORES (2005) The nuts and bolts of deionization. *Water Technology Magazine*, 28.
4. BLADH, K. W., BIDEAUX, R. A., ANTHONY-MORTON, E. & NICHOLS, B. G. (2001) *Handbook of Mineralogy. Mineralogical Society of America.*
5. CASIDAY, R., NOELKEN, G. & FREY, R. (2008) Treating the Public Water Supply:
What Is In Your Water, and How Is It Made Safe to Drink? Department of Chemistry, Washington University.
6. DIONISIOU, N., MATSI, T. & MISOPOLINOS, N. D. (2006) Use of magnesia for boron removal from irrigation water. *Journal of Environmental Quality*, 35, 2222-2228.
7. DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS (2004) Análisis de factibilidad de embalses para los valles Lluta y Azapa I Región. Informe final.
8. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (1987) *Balance Hídrico de Chile.*
9. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (2004) Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Lluta.
10. GALLEGUILLOS, G., OYARZUN, J., MATURANA, H. & OYARZUN, R. (2008) Arsenic capture in dams: the Elqui River case, Chile. *Ingenieria Hidraulica En Mexico*, 23, 29-36.
11. HENNING, K.-D. & DEGEL, J. (1990) Activated Carbon for Solvent Recovery. *Meeting of the European Rotogravure Association Engineers Group Mulhouse. France.*
12. JAMIS, P., MUHR, H. & PLASARI, E. (2002) Boron removal from waste solutions using a multiphase coprecipitation processes. p.975–981. *15th International Symposium on Industrial Crystallization. Sorrento, Italy.*
13. JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY (2005) The study of the development of water resources in Northern Chile. Informe principal.
14. KALENDA, P. (2002) Application of associative thickeners to water-borne coatings. *Pigment & Resin Technology*, 31, 284 – 289.
15. KNEEBONE, P. E. & HERING, J. G. (2000) Behavior of arsenic and other redox sensitive elements in Crowley Lake, CA: A reservoir in the Los Angeles Aqueduct system. *Environmental Science & Technology*, 34, 4307-4312.
16. KNEEBONE, P. E., O'DAY, P. A., JONES, N. & HERING, J. G. (2002) Deposition and fate of arsenic in iron- and arsenic-enriched reservoir sediments. *Environmental Science & Technology*, 36, 381-386.
17. MELNYK, L., GONCHARUK, V., BUTNYK, I. & TSAPIUK, E. (2007) Development of the sorption-membrane "green" technology for boron removal from natural and wastewaters. *Desalination*, 205, 206-213.
18. MINISTRY OF EDUCATION SINGAPORE GOVERNMENT (2007) Digital Resources: Chemistry.
19. NABLE, R. O., BANUELOS, G. S. & PAULL, J. G. (1997) Boron toxicity. *Plant and Soil*, 193, 181-198.

20. PARKHURST, D. L. & APPELO, C. A. J. (1999) User's guide to PHREEQC (version 2).-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 310 p.
21. SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (2004) Yacimientos de rocas y minerales industriales de la Región de Tarapacá. Escala 1:500.000.
22. SIMONNOT, M. O., CASTEL, C., NICOLAI, M., ROSIN, C., SARDIN, M. & JAUFFRET, H. (2000) Boron removal from drinking water with a boron selective resin: Is the treatment really selective? *Water Research*, 34, 109-116.
23. SNOEYINK, V. L. & JENKINS, D. (1980) *Water Chemistry*, New York, John Wiley & Sons.
24. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2008) Drinking Water Health Advisory for Boron.
25. U.S. GEOLOGICAL SURVEY (variously dated) *National field manual for the collection of water-quality data: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chaps. A1-A9*.
26. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (2000) Technologies and Costs for Removal of Arsenic from Drinking Water. EPA 815R00028, Prepared by Malcolm Pirnie, Inc. under contract 68C60039 for EPA ORD.
27. VERTEX HYDROPORE (2008) What is reverse osmosis?
http://www.reverseosmosis.com.au/reverse_osmosis_definition.htm.
28. WORLD HEALTH ORGANIZATION (2001) Environmental Health Criteria 224. Arsenic and Arsenic Compounds. Second edition. Geneva.
29. WORLD HEALTH ORGANIZATION (2003) Boron in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality.
30. XU, Y. & JIANG, J. Q. (2008) Technologies for boron removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47, 16-24.

Referencia espacial:

[*] Software Google Earth, Versión 4.3.7

12. Anexos

12.1 Coordenadas geográficas de los puntos de muestreo del estudio. Datum PSAD 1956 / UTM Uso 19 S.

Campaña 1

GPS	Nombre	Fecha muestreo	UTM E	UTM N
9	Colpitas antes de Caracarani	03-12-07	433775	8010581
10	Lluta en Alcerreca	03-12-07	433233	8009651
11	Caracarani antes de Colpitas	03-12-07	433484	8010637
16	Caracarani desp de quebrada por Hospicio-Cruce	03-12-07	433200	8021184
20	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-arriba	03-12-07	435488	8025924
22	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-arriba	03-12-07	436034	8025657
24	Quebrada a Carac ornte Qcal-Phta en Pahuta	03-12-07	438421	8024743
27	Quebrada a Colpitas-despues borateras-cruce	03-12-07	452165	8013561
29	Quebrada a Colpitas-Allane 2	03-12-07	451678	8011995
57	Quebrada a Caracarani lado oriente antes j Azufre	04-12-07	430904	8044364
58	Caracarani en nacimiento	04-12-07	429451	8044521
61	Afloramiento a Azufre-terma	04-12-07	413098	8041120
62	Azufre en cruce camino abajo azufrera	04-12-07	413278	8039553
63	Azufre en cruce camino abajo azufrera	04-12-07	413286	8039587
64	Azufre en cruce camino abajo azufrera	04-12-07	413278	8039577
65	Azufre en cruce camino abajo azufrera	04-12-07	413276	8039554
66	Azufre en cruce camino abajo azufrera	04-12-07	413275	8039529
67	Azufre en cruce camino abajo azufrera	04-12-07	413267	8039451
68	Azufre aguas abajo azufrera y antes bocatoma canal	04-12-07	415332	8036100
69	Quebrada cerca de Humapalca	04-12-07	425360	8030123
70	Solido-Quebrada a Caracarani en Humapalca	04-12-07	425533	8028605
71	Caracarani en Humapalca	04-12-07	425335	8027896
74	Azufre antes de Caracarani	04-12-07	425223	8027928
75	Caracarani despues de Azufre	04-12-07	425841	8027053
76	Quebrada a Caracarani despues de Azufre	04-12-07	426240	8025484
99	Canal Putre	05-12-07	435381	7987637
102	Canal Putre	05-12-07	435070	7987217
106	Quebrada Putre-junta Putre 4	05-12-07	436656	7987309
107	Quebrada Putre	05-12-07	436718	7987251
121	Canal Socoroma	06-12-07	437714	7980458
123	Canal Socoroma	06-12-07	437199	7981773
131	Quebrada hacia Socoroma	06-12-07	436335	7980829
134	Lluta en Tocontasi	06-12-07	403421	7968653
135	Lluta en Molinos	06-12-07	400265	7968235
140	Lluta en Poconchile	06-12-07	387098	7960214
141	Lluta en Panamericana	06-12-07	363270	7965503

Campaña 2

GPS	Nombre	Fecha muestreo	UTM E	UTM N
142	Lluta en Poconchile	17-12-07	387110	7960225
143	Lluta Vadeo Sora	17-12-07	406775	7970210
144	Canal seco que cruza camino y que tuvo agua	17-12-07	408984	7972774
145	Lluta Vadeo Arancha	17-12-07	412878	7973970
146	Lluta Vadeo Vinto	17-12-07	415322	7974792
150	Lluta en Chironta	17-12-07	419855	7975635
151	Solido-Chironta	17-12-07	419732	7975422
152	Lluta en Chironta-Vinto 1	17-12-07	419283	7975283
153	Lluta en Chironta-Vinto 2	17-12-07	418474	7974896
154	Lluta en Chironta-Vinto 3	17-12-07	417931	7975109
155	Lluta en Chironta-Vinto 4	17-12-07	417447	7975178
156	Lluta Vadeo Vinto-Chironta	17-12-07	417113	7975233
159	Lluta Vadeo Vinto	17-12-07	415304	7974767
160	Lluta Vadeo Arancha	17-12-07	412864	7973973
161	Lluta en Sora-Tranque	17-12-07	407136	7970617
162	Lluta Vadeo Sora	17-12-07	406783	7970191
163	Lluta en Poconchile	17-12-07	387118	7960116
165	Acueducto Ferrocarril-Estacion Central	18-12-07	398864	7969913
169	Solido-Puquios-formacion rocosa-piedras blancas	18-12-07	424113	7993159
171	Solido-Huayla-Puquios-2-Piedras blancas y anaranj	18-12-07	427026	7997703
172	Solido-Huayla-Puquios-1-Piedras blancas y anaranj	18-12-07	428360	7999058
173	Solido-Huayla-Estratos anaranjados humedos	18-12-07	428710	8003852
174	Acueducto Ferrocarril-Huayla	18-12-07	429020	8003744
184	Lluta antes Huayla	18-12-07	431528	8004790
185	Quebrada Huayla	18-12-07	431527	8004776
186	Lluta despues Huayla	18-12-07	431575	8004758
190	Caracarani antes de Colpitas	18-12-07	433488	8010468
191	Colpitas antes de Caracarani	18-12-07	433525	8010394
192	Lluta en Alcerreca	18-12-07	433425	8010143
207	Quebrada a Colpitas-Allane 2	19-12-07	451684	8011986
208	Quebrada a Colpitas-Allane 3	19-12-07	452630	8012149
209	Quebrada a Colpitas-despues borateras-cruce	19-12-07	452153	8013530
212	Quebrada a Colpitas-poniente borateras	19-12-07	453171	8016148
213	Quebrada a Colpitas en borateras	19-12-07	454976	8015224
216	Boratera	19-12-07	454511	8014684
217	Boratera	19-12-07	454513	8014691
218	Quebrada a Colpitas en borateras	19-12-07	454661	8014656
219	Quebrada a Colpitas en borateras	19-12-07	454679	8014638
220	Quebrada a Colpitas en borateras	19-12-07	454698	8014628
221	Quebrada a Colpitas en borateras	19-12-07	454741	8014566

Campaña 2, continuación

GPS	Nombre	Fecha muestreo	UTM E	UTM N
222	Solido-Costra en sector boratera	19-12-07	454803	8014605
223	Quebrada a Colpitas en borateras	19-12-07	454952	8014791
224	Quebrada a Colpitas en borateras	19-12-07	454994	8014893
227	Quebrada a Colpitas en Tacopa	19-12-07	449890	8015796
236	Quebrada a Carac ornte Qcal-Phta en Pahuta	19-12-07	438485	8024678
237	Quebrada a Carac ornte Qcal-Phta en Pahuta	19-12-07	438425	8024727
238	Quebrada a Caracarani en Ancolacani sin agua	19-12-07	436445	8025363
239	Quebrada a Caracarani en Ancolacani	19-12-07	436170	8025343
240	Quebrada a Caracarani en Ancolacani	19-12-07	436121	8025447
241	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-arriba	19-12-07	436038	8025659
243	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-arriba	19-12-07	435498	8025933
247	Quebrada a Caracarani por Hospicio-arriba	19-12-07	431797	8026316
248	Quebrada a Caracarani lado oriente por Cascavillani	19-12-07	430360	8026840
254	Azufre-Canal	19-12-07	421611	8026832
255	Azufre-Canal	19-12-07	421062	8029844
256	Azufre-Canal	19-12-07	421639	8026348
257	Azufre-Canal	19-12-07	422300	8025854
258	Azufre-Canal-perdida a obras evaporacion	19-12-07	422481	8025981
260	Azufre antes de Caracarani	19-12-07	425207	8027933
261	Caracarani en Humapalca	19-12-07	425330	8027927
262	Caracarani despues de Azufre	19-12-07	425856	8027071
263	Quebrada a Caracarani Poniente-Seca	19-12-07	431307	8014489
264	Caracarani antes de Colpitas	19-12-07	433492	8010466
265	Colpitas antes de Caracarani	19-12-07	433498	8010429

Campaña 3

GPS	Nombre	Fecha muestreo	UTM E	UTM N
280	Caracarani en Humapalca	28-01-08	425338	8027904
281	Azufre antes de Caracarani	28-01-08	425221	8027940
282	Caracarani despues de Azufre	28-01-08	425829	8027049
283	Caracarani antes de Colpitas	28-01-08	433469	8010493
284	Colpitas antes de Caracarani	28-01-08	433506	8010405
287	Caracarani desp de quebrada por Hospicio-Cruce	29-01-08	433209	8021166
288	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-bajo	29-01-08	434566	8021893
289	Quebrada a Carac ornte por Quecalani-Pahuta	29-01-08	436862	8018415
290	Quebrada a Carac ornte Qcal-Phta en Phta-Canl	29-01-08	436868	8018693
291	Quebrada a Carac oriente por Ancol-Chuquia-bajo	29-01-08	434554	8021896
293	Azufre en bocatoma canal	29-01-08	419134	8031509
296	Quebrada Socoroma	30-01-08	437508	7980848
297	Canal Socoroma	30-01-08	437338	7980568
298	Lluta Vadeo Arancha	30-01-08	412942	7973985
299	Lluta en Tocontasi	30-01-08	403433	7968642
300	Lluta en Tocontasi	31-01-08	403435	7968648
301	Lluta en Poconchile	31-01-08	387119	7960231
302	Lluta en Panamericana	31-01-08	363273	7965504
303	Lluta en desembocadura	31-01-08	360414	7963922
304	Lluta en Tocontasi	01-02-08	403486	7968679
305	Lluta en Tocontasi-Canal lateral	01-02-08	403494	7968658
306	Lluta en Poconchile	01-02-08	387050	7960216
307	Lluta en Puente Chacabuco	01-02-08	383200	7963588
308	Lluta en Puente Santa Lucía	01-02-08	369187	7964621
309	Lluta antes Desalari	01-02-08	364053	7965383
310	Efluente Desalari a Lluta	01-02-08	363709	7965500
311	Lluta abajo Desalari	01-02-08	363631	7965523
312	Lluta antes Desalari	01-02-08	363729	7965502
313	Lluta en Panamericana	01-02-08	363270	7965503

Campaña 4

GPS	Nombre	Fecha muestreo	UTM E	UTM N
323	Quebrada Putre-junta Putre 1	08-04-08	436718	7987262
325	Quebrada Putre-junta Putre 2	08-04-08	436727	7987251
327	Quebrada Putre-junta Putre 3	08-04-08	436728	7987241
329	Quebrada Putre-junta Putre 4	08-04-08	436666	7987346
331	Quebrada Putre cerca Virgen	08-04-08	436628	7987277
333	Quebrada al norte de Putre	08-04-08	440070	7988449
335	APR Putre-Vertiente	08-04-08	448432	7991892
337	Quebrada Taipicahua	08-04-08	448459	7991860
339	Quebrada Allane	09-04-08	449850	8012010
341	Quebrada Allane-Canal	09-04-08	449910	8011906
343	Boratera	09-04-08	455355	8015040
345	Boratera	09-04-08	455424	8015019
349	Boratera	09-04-08	455845	8014471
351	Boratera	09-04-08	455450	8014476
353	Quebrada a Colpitas en borateras	09-04-08	454910	8014763
355	Boratera	09-04-08	454515	8014686
357	Quebrada a Caracarani por Hospicio-j Caracarani	09-04-08	432259	8021499
359	Caracarani antes de quebrada por Hospicio	09-04-08	432250	8021493
361	Caracarani desp de quebrada por Hospicio	09-04-08	432291	8021466
363	Quebrada Putre-pv put 06	10-04-08	440074	7988445
365	Quebrada Putre-pv put 04	10-04-08	441570	7988333
367	Quebrada Putre-pv put 03	10-04-08	442449	7988387
369	Quebrada Putre 1	10-04-08	442898	7988020
371	Quebrada Putre 2	10-04-08	443324	7987339
373	Colpitas antes de Caracarani	10-04-08	433784	8010577
375	Quebrada Huayla 2	10-04-08	431592	8004174
377	Lluta en desembocadura	11-04-08	360395	7963934
379	Efluente Desalari al mar	11-04-08	360375	7963937
381	Lluta en Panamericana	11-04-08	363270	7965497
383	Lluta antes Desalari	11-04-08	363724	7965497
385	Efluente Desalari a Lluta	11-04-08	363717	7965493
387	Lluta abajo Desalari	11-04-08	363691	7965495
389	Lluta en Puente Santa Lucía	11-04-08	369094	7964598
391	Lluta en Puente Chacabuco	11-04-08	383165	7963611
393	Tubería Poconchile	11-04-08	387121	7960199
395	Lluta en Poconchile	11-04-08	387089	7960199
397	Lluta en Tocontasi	11-04-08	403433	7968655
399	Lluta Vadeo Sora	11-04-08	406782	7970225
401	Lluta Vadeo Arancha	11-04-08	412848	7973974
403	Lluta Vadeo Vinto	11-04-08	415324	7974777

Campaña 4, continuación

GPS	Nombre	Fecha muestreo	UTM E	UTM N
404	Quebrada a Caracarani Oriente arriba Humapalca	08-04-08	425455	8030322
405	APR Poconchile	11-04-08	389732	7962713
408	Azufre en nacimiento antes azufrera	08-04-08	413309	8041515
410	Azufre en Iron Seep-Azufrera	08-04-08	413054	8040913
412	Azufre en cruce camino abajo azufrera	08-04-08	413268	8039550
414	Azufre en bocatoma canal	08-04-08	419144	8031530
416	Azufre antes de Caracarani	08-04-08	425212	8027935
418	Caracarani en Humapalca	08-04-08	425329	8027926
420	Caracarani despues de Azufre	08-04-08	425828	8027048
428	Quebrada a Colpitas antes borateras	09-04-08	457466	8017673
430		09-04-08	456776	8015186
432	Quebrada a Colpitas antes borateras	09-04-08	456682	8016082
434	Quebrada a Colpitas antes borateras	09-04-08	456692	8016377
438	Quebrada a Caracarani en SicaSica	09-04-08	430518	8022913
440	Caracarani desp de Sica y despues q Cascavillani	09-04-08	430568	8022791
442	Caracarani desp de Sica y antes q Cascavillani	09-04-08	430380	8023069
444	Lluta en Alcerreca	10-04-08	433459	8010505
448	Caracarani antes de Colpitas	10-04-08	433461	8010507
452	Lluta antes Huayla	10-04-08	431543	8004808
454	Quebrada Huayla	10-04-08	431522	8004799
456	Lluta despues Huayla	10-04-08	431641	8004748

12.2 Información de salida de simulaciones en PHREEQC

Especiación del río Azufre.

Especie	Molaridad (M)	Actividad (M)
H ⁺	2,45E+01	2,00E+01
OH ⁻	2,57E-10	1,86E-10
Al ⁺³	4,67E-01	6,37E-02
AlSO ₄ ⁺	3,94E-01	2,90E-01
Al(SO ₄) ₂ ⁻	1,36E-01	9,99E-02
AlF ⁺²	1,05E-02	3,06E-03
AlOH ⁺²	5,29E-05	1,55E-05
AlF ₂ ⁺	7,95E-06	5,84E-06
Al ₂ (OH) ₂ ⁺⁴	1,99E-08	2,06E-10
Al(OH) ₂ ⁺	1,07E-09	7,87E-10
AlF ₃	3,53E-10	3,53E-10
HAIO ₂	2,63E-14	2,63E-14
Al ₃ (OH) ₄ ⁺⁵	2,03E-14	2,11E-17
AlF ₄ ⁻	5,80E-16	4,26E-16
AlO ₂ ⁻	3,30E-19	2,42E-19
NaAlO ₂	1,47E-21	1,47E-21
Al ₁₃ O ₄ (OH) ₂₄ ⁺⁷	0,00E+00	0,00E+00
Al total	1,01E+00	

B(OH) ₃	2,82E+00	2,82E+00
BO ₂ ⁻	7,90E-08	5,80E-08
CaB(OH) ₄ ⁺	4,19E-08	3,08E-08
MgB(OH) ₄ ⁺	3,46E-08	2,54E-08
NaB(OH) ₄	5,60E-09	5,60E-09
BF ₂ (OH) ₂ ⁻	7,35E-12	5,40E-12
BF ₃ OH ⁻	5,43E-14	3,99E-14
B ₂ O(OH) ₅ ⁻	1,12E-19	8,24E-20
BF ₄ ⁻	2,59E-20	1,91E-20
B(3) total	2,82E+00	
Ca ⁺²	1,71E+01	5,77E+00
CaSO ₄	3,36E+00	3,36E+00
CaCl ⁺	1,21E-01	8,87E-02
CaNO ₃ ⁺	9,40E-03	6,91E-03
CaCl ₂	8,88E-03	8,88E-03
CaF ⁺	1,76E-07	1,29E-07
CaB(OH) ₄ ⁺	4,19E-08	3,08E-08
CaOH ⁺	5,54E-11	4,07E-11
Ca total	2,06E+01	
Cl ⁻	1,05E+02	7,46E+01
NaCl	4,48E-01	4,48E-01
HCl	3,26E-01	3,26E-01
MgCl ⁺	3,25E-01	2,39E-01
FeCl ²⁺	2,28E-01	1,68E-01
CaCl ⁺	1,21E-01	8,87E-02
KCl	1,46E-02	1,46E-02
CaCl ₂	8,88E-03	8,88E-03
MnCl ⁺	8,29E-03	6,09E-03
FeCl ⁺²	5,12E-03	1,50E-03
ZnCl ⁺	4,68E-03	3,44E-03
PbCl ⁺	3,92E-03	2,88E-03
PbCl ₂	7,65E-04	7,65E-04
ZnCl ₂	3,69E-04	3,69E-04
ZnCl ₄ ⁻²	4,95E-05	1,37E-05
PbCl ₃ ⁻	3,91E-05	2,87E-05
ZnCl ₃ ⁻	2,83E-05	2,08E-05
MnCl ₃ ⁻	1,36E-05	1,00E-05
PbCl ₄ ⁻²	6,52E-06	1,80E-06
FeCl ₄ ⁻	1,53E-06	1,12E-06
FeCl ⁺	2,45E-08	1,80E-08
Zn(OH)Cl	6,08E-09	6,08E-09
FeCl ₂	6,79E-12	6,79E-12
FeCl ₄ ⁻²	3,92E-13	1,08E-13
Cl(-1) total	1,07E+02	

AlF ⁺²	1,05E-02	3,06E-03
HF	1,16E-04	1,16E-04
FeF ⁺²	4,33E-05	1,27E-05
AlF ²⁺	7,95E-06	5,84E-06
F-	6,64E-06	4,80E-06
MgF ⁺	6,13E-07	4,50E-07
CaF ⁺	1,76E-07	1,29E-07
NaF	1,69E-08	1,69E-08
MnF ⁺	9,13E-09	6,71E-09
ZnF ⁺	5,25E-09	3,85E-09
FeF ²⁺	1,13E-09	8,33E-10
AlF ₃	3,53E-10	3,53E-10
PbF ⁺	6,36E-11	4,67E-11
H ₂ F ₂	5,38E-11	5,38E-11
BF ₂ (OH) ₂ ⁻	7,35E-12	5,40E-12
HF ₂ ⁻	1,62E-13	1,19E-13
BF ₃ OH ⁻	5,43E-14	3,99E-14
FeF ⁺	5,19E-14	3,82E-14
AlF ₄ ⁻	5,80E-16	4,26E-16
PbF ₂	1,37E-18	1,37E-18
BF ₄ ⁻	2,59E-20	1,91E-20
SiF ₆ ⁻²	1,46E-29	4,03E-30
F total	1,06E-02	
Fe ⁺²	1,03E-06	3,47E-07
FeSO ₄	2,44E-07	2,44E-07
FeCl ⁺	2,45E-08	1,80E-08
FeCl ²	6,79E-12	6,79E-12
FeCl ₄ ⁻²	3,92E-13	1,08E-13
FeF ⁺	5,19E-14	3,82E-14
FeOH ⁺	7,45E-15	5,48E-15
Fe(OH) ₂	2,17E-24	2,17E-24
Fe(OH) ₃ ⁻	5,87E-33	4,31E-33
Fe(OH) ₄ ⁻²	0,00E+00	0,00E+00
Fe(2) total	1,30E-06	
Fe ⁺³	1,64E+00	2,24E-01
FeOH ⁺²	2,46E-01	7,20E-02
FeCl ₂ ⁺	2,28E-01	1,68E-01
FeSO ₄ ⁺	8,31E-02	6,11E-02
Fe ₂ (OH) ₂ ⁺⁴	1,35E-02	1,40E-04
Fe(SO ₄) ₂ ⁻	9,83E-03	7,23E-03
FeCl ⁺²	5,12E-03	1,50E-03
FeNO ₃ ⁺²	1,83E-03	5,34E-04
Fe(OH) ₂ ⁺	1,62E-03	1,19E-03
FeF ⁺²	4,33E-05	1,27E-05

$\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{+5}$	3,35E-05	3,47E-08
FeCl_4^-	1,53E-06	1,12E-06
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	2,78E-08	2,78E-08
FeF^{2+}	1,13E-09	8,33E-10
$\text{Fe}(\text{OH})_4^-$	4,74E-16	3,48E-16
Fe(3) total	2,24E+00	
K^+	1,05E+01	7,47E+00
KSO_4^-	3,47E-01	2,55E-01
KCl	1,46E-02	1,46E-02
KHSO_4	2,87E-03	2,87E-03
KOH	1,29E-12	1,29E-12
K total	1,09E+01	
Mg^{+2}	1,02E+01	4,01E+00
MgSO_4	3,47E+00	3,47E+00
MgCl^+	3,25E-01	2,39E-01
MgF^+	6,13E-07	4,50E-07
$\text{MgB}(\text{OH})_4^+$	3,46E-08	2,54E-08
$\text{Mg}_4(\text{OH})_4^{+4}$	0,00E+00	0,00E+00
Mg total	1,40E+01	
Mn^{+2}	1,54E-01	5,19E-02
MnSO_4	4,78E-02	4,78E-02
MnCl^+	8,29E-03	6,09E-03
MnNO_3^+	2,67E-05	1,96E-05
MnCl_3^-	1,36E-05	1,00E-05
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$	1,18E-08	1,18E-08
MnF^+	9,13E-09	6,71E-09
MnOH^+	9,06E-11	6,66E-11
$\text{Mn}_2\text{OH}^{+3}$	5,35E-14	3,70E-15
$\text{Mn}(\text{OH})_2$	8,15E-21	8,15E-21
$\text{Mn}_2(\text{OH})_3^+$	5,74E-25	4,21E-25
$\text{Mn}(\text{OH})_3^-$	5,19E-31	3,82E-31
$\text{Mn}(\text{OH})_4^{-2}$	0,00E+00	0,00E+00
Mn(2) total	2,10E-01	0,00E+00
NO_3^-	3,36E-01	2,39E-01
CaNO_3^+	9,40E-03	6,91E-03
FeNO_3^{+2}	1,83E-03	5,34E-04
HNO_3	1,86E-04	1,86E-04
MnNO_3^+	2,67E-05	1,96E-05
PbNO_3^+	7,92E-06	5,82E-06
$\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$	1,18E-08	1,18E-08
N(5) total	3,47E-01	0,00E+00
Na^+	5,10E+01	3,75E+01
NaSO_4^-	1,50E+00	1,10E+00
NaCl	4,48E-01	4,48E-01

NaHSiO ₃	2,11E-08	2,11E-08
NaF	1,69E-08	1,69E-08
NaB(OH) ₄	5,60E-09	5,60E-09
NaOH	1,24E-12	1,24E-12
NaAlO ₂	1,47E-21	1,47E-21
Na total	5,30E+01	0,00E+00
Pb ⁺²	1,76E-04	1,85E-04
PbCl ⁺	0,00E+00	0,00E+00
PbCl ₂	4,94E-03	1,45E-03
PbCl ₃ ⁻	3,92E-03	2,88E-03
PbNO ₃ ⁺	7,65E-04	7,65E-04
PbCl ₄ ⁻²	3,91E-05	2,87E-05
PbOH ⁺	7,92E-06	5,82E-06
PbF ⁺	6,52E-06	1,80E-06
Pb ₂ OH ⁺³	1,98E-09	1,46E-09
Pb(OH) ₂	6,36E-11	4,67E-11
PbF ₂	6,06E-13	4,20E-14
Pb(OH) ₃ ⁻	2,92E-17	2,92E-17
Pb ₃ (OH) ₄ ⁺²	1,37E-18	1,37E-18
PbClO ₃ ⁺	2,01E-26	1,48E-26
Pb ₄ (OH) ₄ ⁺⁴	8,43E-32	2,46E-32
Pb ₆ (OH) ₈ ⁺⁴	9,28E-33	6,82E-33
Pb(ClO ₃) ₂	3,43E-33	3,56E-35
Pb (2) total	9,68E-03	0,00E+00
SO ₄ ⁻²	1,58E-22	1,64E-24
HSO ₄ ⁻	0,00E+00	0,00E+00
MgSO ₄	1,61E+01	4,44E+00
CaSO ₄	8,70E+00	6,40E+00
NaSO ₄ ⁻	3,47E+00	3,47E+00
AlSO ₄ ⁺	3,36E+00	3,36E+00
KSO ₄ ⁻	1,50E+00	1,10E+00
Al(SO ₄) ₂ ⁻	3,94E-01	2,90E-01
FeSO ₄ ⁺	3,47E-01	2,55E-01
MnSO ₄	1,36E-01	9,99E-02
ZnSO ₄	8,31E-02	6,11E-02
Fe(SO ₄) ₂ ⁻	4,78E-02	4,78E-02
KHSO ₄	4,16E-02	4,16E-02
H ₂ SO ₄	9,83E-03	7,23E-03
FeSO ₄	2,87E-03	2,87E-03
S(6) total	3,43E+01	
SiO ₂	2,44E-07	2,44E-07
NaHSiO ₃	0,00E+00	0,00E+00
HSiO ₃ ⁻	2,51E+00	2,51E+00
H ₆ (H ₂ SiO ₄) ₄ ⁻²	2,11E-08	2,11E-08

$\text{H}_2\text{SiO}_4^{-2}$	1,28E-08	9,42E-09
SiF_6^{-2}	8,00E-18	2,21E-18
$\text{H}_4(\text{H}_2\text{SiO}_4)_4^{-4}$	2,48E-19	6,85E-20
Si total	2,51E+00	
Zn^{+2}	5,05E-35	2,78E-37
ZnSO_4	0,00E+00	0,00E+00
ZnCl^+	1,68E-01	5,68E-02
ZnCl_2	4,16E-02	4,16E-02
ZnCl_4^{-2}	4,68E-03	3,44E-03
ZnCl^{3-}	3,69E-04	3,69E-04
Zn(OH)Cl	4,95E-05	1,37E-05
ZnF^+	2,83E-05	2,08E-05
ZnOH^+	6,08E-09	6,08E-09
Zn(OH)_2	5,25E-09	3,85E-09
Zn(OH)_3^-	1,64E-09	1,21E-09
ZnClO_4^+	6,65E-16	6,65E-16
Zn(OH)_4^{-2}	1,40E-25	1,03E-25
Zn total	2,15E-01	

Índice de saturación de minerales en el río Azufre. Los índices de saturación ensombrecidos indican que el mineral debería formarse.

Nombre		SI
Afwillite	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})_6$	-64
Akermanite	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	-49,21
Al	Al	-150,99
Al(g)	Al	-204,12
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	-37,02
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-18,55
Alamosite	PbSiO_3	-10,8
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-9,63
Albite_high	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-11,02
Albite_low	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-9,63
AlF_3	AlF_3	-12,14
Alum-K	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	-5,99
Alunite	$\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$	-10,46
Amesite-14A	$\text{Mg}_4\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-78,74
Analcime	$\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{2,04}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-10,77
Analcime-dehy	$\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{2,04}\text{O}_6$	-17,43
Andalusite	Al_2SiO_5	-18,4
Andradite	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	-36,79
Anglesite	PbSO_4	-0,2
Anhydrite	CaSO_4	-0,38

Annite	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-56,72
Anorthite	$\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$	-30,92
Antarcticite	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-8,6
Anthophyllite	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-83,74
Antigorite	$\text{Mg}_{48}\text{Si}_{34}\text{O}_{85}(\text{OH})_{62}$	-540,51
Aphthitalite	$\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$	-8,62
Arcanite	K_2SO_4	-4,59
B	B	-111,72
B(g)	B	-207,15
B_2O_3	B_2O_3	-10,76
Bassanite	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	-1,02
Beidellite-Ca	$\text{Ca}_{1.65}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-13,84
Beidellite-H	$\text{H}_{3.3}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-13,02
Beidellite-K	$\text{K}_{3.3}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-13,81
Beidellite-Mg	$\text{Mg}_{1.65}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-13,85
Beidellite-Na	$\text{Na}^{3.3}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-13,95
$\text{BF}_3(\text{g})$	BF_3	-30,23
Birnessite	$\text{Mn}_8\text{O}_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-42,46
Bischofite	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-9,06
Bixbyite	Mn_2O_3	-12,78
Bloedite	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-7,48
Boehmite	AlO_2H	-7,48
Borax	$\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-21,11
Boric acid	$\text{B}(\text{OH})_3$	-2,24
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	-16,11
Ca	Ca	-141,35
Ca(g)	Ca	-167,89
Ca-Al Pyroxene	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$	-38,19
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-55,46
$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-29,63
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	-113,88
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	-139,52
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-100,84
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	-97,28
$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-69,37
CaAl_2O_4	CaAl_2O_4	-47,16
$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-35,05
CaAl_4O_7	CaAl_4O_7	-69,1
Carnallite	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-12,19
$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (beta)	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	-1,21
Celadonite	$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-16,74
Chalcedony	SiO_2	1,4
Chamosite-7A	$\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$	-48,36
Chloromagnesite	MgCl_2	-27,64

Chrysotile	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-34,82
Cl_2 (g)	Cl_2	-12,4
Clinochlore-14A	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-72,54
Clinochlore-7A	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-76,01
Clinoptilolite-Ca	$\text{Ca}_{1,7335}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,922\text{H}_2\text{O}$	-25,52
Clinoptilolite-dehy-Ca	$\text{Ca}_{1,7335}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36}$	-63
Clinoptilolite-dehy-K	$\text{K}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36}$	-61,54
Clinoptilolite-dehy-Na	$\text{Na}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36}$	-63,39
Clinoptilolite-hy-Ca	$\text{Ca}_{1,7335}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 11,645\text{H}_2\text{O}$	-25,45
Clinoptilolite-hy-K	$\text{K}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 7,499\text{H}_2\text{O}$	-24,29
Clinoptilolite-hy-Na	$\text{Na}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,877\text{H}_2\text{O}$	-25,89
Clinoptilolite-K	$\text{K}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,922\text{H}_2\text{O}$	-24,03
Clinoptilolite-Na	$\text{Na}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,922\text{H}_2\text{O}$	-25,89
Clinozoisite	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	-49,21
Coesite	SiO_2	0,84
Colemanite	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-34,48
Cordierite_anhyd	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	-64,01
Cordierite_hydr	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \cdot \text{H}_2\text{O}$	-61,4
Corundum	Al_2O_3	-18,37
Cotunnite	PbCl_2	-3,04
Cristobalite(alpha)	SiO_2	1,11
Cristobalite(beta)	SiO_2	0,63
Cronstedtite-7A	$\text{Fe}_2\text{Fe}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$	-29,81
Daphnite-14A	$\text{Fe}_5\text{AlAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-92,2
Daphnite-7A	$\text{Fe}_5\text{AlAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-95,69
Diaspore	AlHO_2	-7,06
Dicalcium_silicate	Ca_2SiO_4	-39
Diopside	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	-24,88
Enstatite	MgSiO_3	-13,48
Epidote	$\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{OH}$	-37,82
Epidote-ord	$\text{FeCa}_2\text{Al}_2(\text{OH})(\text{SiO}_4)_3$	-37,81
Epsomite	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-2,8
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	-73,9
F_2 (g)	F_2	-81,98
Fayalite	Fe_2SiO_4	-34,89
Fe	Fe	-64,45
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	-20,66
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	-4,82
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	-19,24
FeF_2	FeF_2	-24,06
FeF_3	FeF_3	-9,43
FeO	FeO	-20,37
Ferrite-Ca	CaFe_2O_4	-19,39
Ferrite-Dicalcium	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	-55,09

Ferrite-Mg	MgFe ₂ O ₄	-19,19
Ferrite-Zn	ZnFe ₂ O ₄	-11,33
Ferrosilite	FeSiO ₃	-16,48
FeSO ₄	FeSO ₄	-14,96
Fluorite	CaF ₂	-8,72
Forsterite	Mg ₂ SiO ₄	-29,91
Foshagite	Ca ₄ Si ₃ O ₉ (OH) ₂ ·0.5H ₂ O	-71,58
Gehlenite	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	-58,3
Gibbsite	Al(OH) ₃	-7,6
Gismondine	Ca ₂ Al ₄ Si ₄ O ₁₆ ·9H ₂ O	-46,21
Glauberite	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	-4,33
Goethite	FeOOH	0,46
Greenalite	Fe ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-47,17
Grossular	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	-57,44
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-0,08
Gyrolite	Ca ₂ Si ₃ O ₇ (OH) ₂ ·1.5H ₂ O	-28,87
H ₂ (g)	H ₂	-41,69
H ₂ O	H ₂ O	-1,91
Halite	NaCl	-4,09
Hatrurite	Ca ₃ SiO ₅	-75,66
Hausmannite	Mn ₃ O ₄	-25,35
HCl(g)	HCl	-9,67
Hedenbergite	CaFe(SiO ₃) ₂	-30,52
Hematite	Fe ₂ O ₃	1,86
Hercynite	FeAl ₂ O ₄	-35,61
Hexahydrite	MgSO ₄ ·6H ₂ O	-3,03
Hillebrandite	Ca ₂ SiO ₃ (OH) ₂ ·0.17H ₂ O	-38,54
Hydroboracite	MgCaB ₆ O ₁₁ ·6H ₂ O	-33,49
Hydrophilite	CaCl ₂	-16,84
Ice	H ₂ O	-0,09
Illite	K _{0.6} Mg _{0.25} Al _{1.8} Al _{0.5} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂	-17,13
Jadeite	NaAl(SiO ₃) ₂	-12,93
Jarosite	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	0,43
Jarosite-Na	NaFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	-1,45
K	K	-72,6
K(g)	K	-83,86
K-Feldspar	KAlSi ₃ O ₈	-7,08
K ₂ O	K ₂ O	-88,03
K ₃ H(SO ₄) ₂	K ₃ H(SO ₄) ₂	-9,16
Kainite	KMgClSO ₄ ·3H ₂ O	-7,7
KAl(SO ₄) ₂	KAl(SO ₄) ₂	-15,32
Kalsilite	KAlSiO ₄	-13,76
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-11,21
Katoite	Ca ₃ Al ₂ H ₁₂ O ₁₂	-73,67

Kieserite	MgSO ₄ ·H ₂ O	-4,48
KMgCl ₃	KMgCl ₃	-30,11
KMgCl ₃ ·2H ₂ O	KMgCl ₃ ·2H ₂ O	-22,42
Kyanite	Al ₂ SiO ₅	-18,09
Lanarkite	Pb ₂ (SO ₄)O	-10,3
Larnite	Ca ₂ SiO ₄	-40,36
Laumontite	CaAl ₂ Si ₄ O ₁₂ ·4H ₂ O	-22,26
Lawrencite	FeCl ₂	-21,39
Lawsonite	CaAl ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·H ₂ O	-26,13
Leonite	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O	-7,25
Lime	CaO	-32,84
Litharge	PbO	-15,56
Magnetite	Fe ₃ O ₄	-15,18
Manganite	MnO(OH)	-6
Manganosite	MnO	-19,7
Margarite	CaAl ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂	-45,19
Massicot	PbO	-15,76
Matlockite	PbFCl	-5,86
Maximum_Microcline	KAlSi ₃ O ₈	-7,08
Mayenite	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	-497,43
Melanterite	FeSO ₄ ·7H ₂ O	-9,35
Mercallite	KHSO ₄	-4,74
Merwinite	MgCa ₃ (SiO ₄) ₂	-72,28
Mesolite	Na _{0,676} Ca _{0,657} Al _{1,99} Si _{3,01} O ₁₀ ·2,647H ₂ O	-19,87
Mg	Mg	-123,63
Mg(g)	Mg	-144,43
Mg _{1,25} SO ₄ (OH) _{0,5} ·0,5H ₂ O	Mg _{1,25} SO ₄ (OH) _{0,5} ·0,5H ₂ O	-10,41
Mg _{1,5} SO ₄ (OH)	Mg _{1,5} SO ₄ (OH)	-14,39
MgCl ₂ ·2H ₂ O	MgCl ₂ ·2H ₂ O	-18,07
MgCl ₂ ·4H ₂ O	MgCl ₂ ·4H ₂ O	-12,3
MgCl ₂ ·H ₂ O	MgCl ₂ ·H ₂ O	-21,61
MgOHCl	MgOHCl	-18,59
MgSO ₄	MgSO ₄	-10,24
Minium	Pb ₃ O ₄	-41,13
Minnesotaite	Fe ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-43,15
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	-3,51
Misenite	K ₈ H ₆ (SO ₄) ₇	-32,6
Mn	Mn	-84,13
Mn(OH) ₂	Mn(OH) ₂	-16,92
Mn(OH) ₃	Mn(OH) ₃	-12,51
MnCl ₂ ·2H ₂ O	MnCl ₂ ·2H ₂ O	-10,79
MnCl ₂ ·4H ₂ O	MnCl ₂ ·4H ₂ O	-9,38
MnCl ₂ ·H ₂ O	MnCl ₂ ·H ₂ O	-12,45
MnO ₂ (gamma)	MnO ₂	-4,91

MnSO ₄	MnSO ₄	-9,72
Molysite	FeCl ₃	-21,61
Monticellite	CaMgSiO ₄	-31,4
Montmor-Ca	Ca _{1.65} Mg _{3.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-11,41
Montmor-K	K _{3.33} Mg _{3.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-11,29
Montmor-Mg	Mg _{4.95} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-11,34
Montmor-Na	Na _{3.33} Mg _{3.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-11,44
Mordenite	Ca _{2.895} Na _{3.61} Al _{9.94} Si _{5.06} O ₁₂ · 3.468 H ₂ O	-6,33
Mordenite-dehy	Ca _{2.895} Na _{3.61} Al _{9.94} Si _{5.06} O ₁₂	-22,2
Muscovite	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	-20,72
Na	Na	-68,21
Na(g)	Na	-82,49
Na ₂ O	Na ₂ O	-69,46
Na ₂ SiO ₃	Na ₂ SiO ₃	-24,86
Na ₃ H(SO ₄) ₂	Na ₃ H(SO ₄) ₂	-9,79
Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ · 2H ₂ O	Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ · 2H ₂ O	-9,11
Na ₄ SiO ₄	Na ₄ SiO ₄	-74,51
Na ₆ Si ₂ O ₇	Na ₆ Si ₂ O ₇	-108,55
NaFeO ₂	NaFeO ₂	-19,37
Natrolite	Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ · 2H ₂ O	-25,19
Natrosilite	Na ₂ Si ₂ O ₅	-23,08
Nepheline	NaAlSiO ₄	-16,16
Niter	KNO ₃	-5,26
NO ₂ (g)	NO ₂	-12,55
Nontronite-Ca	Ca _{1.65} Fe ₂ Al _{3.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	5,34
Nontronite-H	H _{3.33} Fe ₂ Al _{3.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	6,16
Nontronite-K	K _{3.33} Fe ₂ Al _{3.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	5,37
Nontronite-Mg	Mg _{1.65} Fe ₂ Al _{3.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	5,33
Nontronite-Na	Na _{3.33} Fe ₂ Al _{3.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	5,23
O ₂ (g)	O ₂	-3,94
Okenite	CaSi ₂ O ₄ (OH) ₂ · H ₂ O	-14,49
Oxychloride-Mg	Mg ₂ Cl(OH) ₃ · 4H ₂ O	-26,67
Paragonite	NaAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	-24,19
Paralaurionite	PbClOH	-5,4
Pargasite	NaCa ₂ Al ₃ Mg ₄ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂	-114,41
Pb	Pb	-48,3
Pb(g)	Pb	-78,16
Pb ₂ SiO ₄	Pb ₂ SiO ₄	-26,09
Pb ₃ SO ₆	Pb ₃ SO ₆	-24,22
Pb ₄ Cl ₂ (OH) ₆	Pb ₄ Cl ₂ (OH) ₆	-32,71
Pb ₄ SO ₇	Pb ₄ SO ₇	-38,22
PbF ₂	PbF ₂	-17,27
PbFCl	PbFCl	-6,03
Pentahydrate	MgSO ₄ · 5H ₂ O	-3,37

Periclase	MgO	-21,43
Phlogopite	$\text{KAlMg}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-43,88
Picromerite	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-6,93
Plattnerite	PbO_2	-12,02
Polyhalite	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-6,23
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-22,34
Prehnite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-38,73
Pseudowollastonite	CaSiO_3	-15,97
Pyrolusite	MnO_2	-2,77
Pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-9,59
Quartz	SiO_2	1,68
Rankinite	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$	-55,74
Rhodonite	MnSiO_3	-13,64
Ripidolite-14A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-80,1
Ripidolite-7A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-83,58
Sanidine_high	KAlSi_3O_8	-8,36
Saponite-Ca	$\text{Ca}_{.165}\text{Mg}_3\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,68
Saponite-H	$\text{H}_{.33}\text{Mg}_3\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-32,86
Saponite-K	$\text{K}_{.33}\text{Mg}_3\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,65
Saponite-Mg	$\text{Mg}_{3.165}\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,69
Saponite-Na	$\text{Na}_{.33}\text{Mg}_3\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,79
Scacchite	MnCl_2	-15,82
Scolecite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-22,06
Sellaite	MgF_2	-9,69
Sepiolite	$\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-42,92
Si	Si	-151,07
Si(g)	Si	-225,44
SiF4(g)	SiF_4	-27,62
Sillimanite	Al_2SiO_5	-18,78
SiO2(am)	SiO_2	0,3
Smectite-high-Fe-Mg	$\text{Ca}_{.025}\text{Na}_{.1}\text{K}_{.2}\text{Fe}_{.5}\text{Fe}_{.2}\text{Mg}_{1.15}\text{Al}_{1.25}\text{Si}_{3.5}\text{H}_2\text{O}_{12}$	-28,3
Smectite-low-Fe-Mg	$\text{Ca}_{.02}\text{Na}_{.15}\text{K}_{.2}\text{Fe}_{.29}\text{Fe}_{.16}\text{Mg}_{.9}\text{Al}_{1.25}\text{Si}_{3.75}\text{H}_2\text{O}_{12}$	-21,18
Spinel	Al_2MgO_4	-37,73
Starkeyite	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-3,76
Stilbite	$\text{Ca}_{1.019}\text{Na}_{.136}\text{K}_{.006}\text{Al}_{2.18}\text{Si}_{6.82}\text{O}_{18} \cdot 7.33\text{H}_2\text{O}$	-15,91
Sylvite	KCl	-3,95
Syngenite	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-3,6
Tachyhydrite	$\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	-30,96
Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-29,43
Tephroite	Mn_2SiO_4	-28,57
Thenardite	Na_2SO_4	-4,87
Tobermorite-11A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{11}\text{O}_{22.5}$	-77,25
Tobermorite-14A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{21}\text{O}_{27.5}$	-75,09
Tobermorite-9A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_6\text{O}_{20}$	-81,02

Todorokite	$\text{Mn}_7\text{O}_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-32,36
Tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-77,3
Tridymite	SiO_2	1,49
Wairakite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	-27,06
Wollastonite	CaSiO_3	-15,71
Wustite	$\text{Fe}_{.947}\text{O}$	-18,1
Xonotlite	$\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$	-103,93
Zincite	ZnO	-12,7
Zn	Zn	-69,45
$\text{Zn}(\text{BO}_2)_2$	$\text{Zn}(\text{BO}_2)_2$	-14,25
$\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-71,44
$\text{Zn}(\text{g})$	Zn	-87,02
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-14,74
$\text{Zn}(\text{OH})_2$ (beta)	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	-13,4
$\text{Zn}(\text{OH})_2$ (epsilon)	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	-13,12
$\text{Zn}(\text{OH})_2$ (gamma)	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	-12,73
$\text{Zn}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	$\text{Zn}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	-19,82
Zn_2SiO_4	Zn_2SiO_4	-19
$\text{Zn}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$	$\text{Zn}_2\text{SO}_4(\text{OH})_2$	-15,03
$\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$	$\text{Zn}_3\text{O}(\text{SO}_4)_2$	-35
$\text{Zn}_5(\text{NO}_3)_2(\text{OH})_8$	$\text{Zn}_5(\text{NO}_3)_2(\text{OH})_8$	-57,55
ZnCl_2	ZnCl_2	-14,1
ZnF_2	ZnF_2	-20,84
ZnSO_4	ZnSO_4	-10,71
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-4,92
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-4,64
$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-6,36
Zoisite	$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{OH}$	-49,26

Índice de saturación de minerales al evaporar aguas del río Azufre.

Nombre		SI
Afwillite	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})_6$	-65,35
Akermanite	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	-50,46
Al	Al	-155,73
Al(g)	Al	-208,85
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	-34,14
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-15,88
Alabandite	MnS	-141,96
Alamosite	PbSiO_3	-12,53
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-8,26
Albite_high	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-9,66
Albite_low	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	-8,27
AlF_3	AlF_3	-10,91

Alum-K	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	-3,55
Alunite	$\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$	-12,92
Amesite-14A	$\text{Mg}_4\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-91,8
Analcime	$\text{Na}_{.96}\text{Al}_{.96}\text{Si}_{2.04}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-10,59
Analcime-dehy	$\text{Na}_{.96}\text{Al}_{.96}\text{Si}_{2.04}\text{O}_6$	-17,22
Andalusite	Al_2SiO_5	-22,31
Andradite	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	-43,81
Anglesite	PbSO_4	-0,54
Anhydrite	CaSO_4	1,03
Annite	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-68,11
Anorthite	$\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$	-34,81
Antarcticite	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-5,47
Anthophyllite	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-82,34
Antigorite	$\text{Mg}_{48}\text{Si}_{34}\text{O}_{85}(\text{OH})_{62}$	-558,81
Aphthitalite	$\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$	-2,97
Arcanite	K_2SO_4	-1,76
B	B	-112,5
B(g)	B	-207,93
B_2O_3	B_2O_3	-8,07
Bassanite	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	0,37
Beidellite-Ca	$\text{Ca}_{.165}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-15,39
Beidellite-H	$\text{H}_{.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-14,37
Beidellite-K	$\text{K}_{.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-15,13
Beidellite-Mg	$\text{Mg}_{.165}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-15,4
Beidellite-Na	$\text{Na}^{.33}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-15,27
$\text{BF}_3(\text{g})$	BF_3	-25,06
Birnessite	$\text{Mn}_8\text{O}_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-45,36
Bischofite	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-5,92
Bixbyite	Mn_2O_3	-14,17
Bloedite	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-3,37
Boehmite	AlO_2H	-10,1
Borax	$\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-15,91
Boric_acid	$\text{B}(\text{OH})_3$	-0,94
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	-17,42
Ca	Ca	-144,05
Ca(g)	Ca	-170,6
Ca-Al Pyroxene	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$	-43,38
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-63,51
$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-27,64
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	-122,93
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	-156,92
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-111,62
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	-108,26
$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-70,43

CaAl ₂ O ₄	CaAl ₂ O ₄	-53,65
CaAl ₂ O ₄ ·10H ₂ O	CaAl ₂ O ₄ ·10H ₂ O	-41,88
CaAl ₄ O ₇	CaAl ₄ O ₇	-80,8
Carnallite	KMgCl ₃ ·6H ₂ O	-6,68
CaSO ₄ ·0.5H ₂ O (beta)	CaSO ₄ ·0.5H ₂ O	0,18
Celadonite	KMgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-15,4
Chalcedony	SiO ₂	2,7
Chamosite-7A	Fe ₂ Al ₂ SiO ₅ (OH) ₄	-60,81
Chloromagnesite	MgCl ₂	-24,3
Chrysotile	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-36,13
Cl ₂ (g)	Cl ₂	-6,37
Clinochlore-14A	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-80,38
Clinochlore-7A	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-83,86
Clinoptilolite-Ca	Ca _{1,7335} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆ ·10.922H ₂ O	-18,29
Clinoptilolite-dehy-Ca	Ca _{1,7335} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆	-55,41
Clinoptilolite-dehy-K	K _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆	-51,5
Clinoptilolite-dehy-Na	Na _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆	-53,32
Clinoptilolite-dehy-NH4-226.72	(NH ₄) _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆	-233,57
Clinoptilolite-hy-Ca	Ca _{1,7335} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆ ·11.645H ₂ O	-18,24
Clinoptilolite-hy-K	K _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆ ·7.499 H ₂ O	-14,5
Clinoptilolite-hy-Na	Na _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆ ·10.877 H ₂ O	-16,19
Clinoptilolite-K	K _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆ ·10.922 H ₂ O	-14,35
Clinoptilolite-Na	Na _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆ ·10.922 H ₂ O	-16,19
Clinoptilolite-NH4-191.48	(NH ₄) _{3,467} Al _{3,45} Fe _{0,017} Si _{14,533} O ₃₆ ·10.922 H ₂ O	-233,96
Clinozoisite	Ca ₂ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ (OH)	-55,71
Coesite	SiO ₂	2,14
Colemanite	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	-29,13
Cordierite_anhyd	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	-70,49
Cordierite_hydr	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ ·H ₂ O	-67,92
Corundum	Al ₂ O ₃	-23,58
Cotunnite	PbCl ₂	-1,45
Cristobalite(alpha)	SiO ₂	2,4
Cristobalite(beta)	SiO ₂	1,93
Cronstedtite-7A	Fe ₂ Fe ₂ SiO ₅ (OH) ₄	-44,1
Daphnite-14A	Fe ₅ AlAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-114,84
Daphnite-7A	Fe ₅ AlAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-118,32
Diaspore	AlHO ₂	-9,68
Dicalcium_silicate	Ca ₂ SiO ₄	-40,27
Diopside	CaMgSi ₂ O ₆	-24,85
Enstatite	MgSiO ₃	-13,46
Epidote	Ca ₂ FeAl ₂ Si ₃ O ₁₂ OH	-45,24
Epidote-ord	FeCa ₂ Al ₂ (OH)(SiO ₄) ₃	-45,24
Epsomite	MgSO ₄ ·7H ₂ O	-1,62

Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	-79,81
F ₂ (g)	F ₂	-78
Fayalite	Fe_2SiO_4	-42,07
Fe	Fe	-70,1
Fe(OH) ₂	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	-24,93
Fe(OH) ₃	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	-8,4
Fe ₂ (SO ₄) ₃	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	-18,21
FeF ₂	FeF_2	-25,74
FeF ₃	FeF_3	-9,13
FeO	FeO	-24,6
Ferrite-Ca	CaFe_2O_4	-27,73
Ferrite-Dicalcium	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	-64,71
Ferrite-Mg	MgFe_2O_4	-27,52
Ferrite-Zn	ZnFe_2O_4	-20,82
Ferrosilite	FeSiO_3	-19,42
FeSO ₄	FeSO_4	-16,5
Fluorite	CaF_2	-7,45
Forsterite	Mg_2SiO_4	-31,17
Foshagite	$\text{Ca}_4\text{Si}_3\text{O}_9(\text{OH})_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	-72,87
Galena	PbS	-129,9
Gehlenite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	-64,77
Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	-10,25
Gismondine	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	-54,3
Glauberite	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	-0,08
Goethite	FeOOH	-3,08
Greenalite	$\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-57,35
Grossular	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	-62,6
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1,26
Gyrolite	$\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$	-27,62
H ₂ (g)	H ₂	-43,14
H ₂ O	H ₂ O	-1,95
H ₂ S (g)	H ₂ S	-131,92
Halite	NaCl	-1,71
Hatrurite	Ca_3SiO_5	-78,21
Hausmannite	Mn_3O_4	-28,14
HCl (g)	HCl	-7,38
Hedenbergite	$\text{CaFe}(\text{SiO}_3)_2$	-33,45
Hematite	Fe_2O_3	-5,19
Hercynite	FeAl_2O_4	-45,05
Hexahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-1,82
Hillebrandite	$\text{Ca}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2 \cdot 0.17\text{H}_2\text{O}$	-39,85
Hydroboracite	$\text{MgCaB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-28,17
Hydrophilite	CaCl_2	-13,5
Ice	H ₂ O	-0,13

Illite	$K_{0.6}Mg_{0.25}Al_{1.8}Al_{0.5}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$	-18,89
Jadeite	$NaAl(SiO_3)_2$	-12,87
Jarosite	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	-4,8
Jarosite-Na	$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	-6,67
K	K	-73,25
K(g)	K	-84,5
K-Feldspar	$KAlSi_3O_8$	-5,73
K ₂ O	K ₂ O	-87,9
K ₃ H(SO ₄) ₂	$K_3H(SO_4)_2$	-3,6
Kainite	$KMgClSO_4 \cdot 3H_2O$	-4,01
KAl(SO ₄) ₂	$KAl(SO_4)_2$	-12,47
Kalsilite	$KAlSiO_4$	-15
Kaolinite	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	-13,89
Katoite	$Ca_3Al_2H_{12}O_{12}$	-82,93
Kieserite	$MgSO_4 \cdot H_2O$	-3,1
KMgCl ₃	$KMgCl_3$	-24,4
KMgCl ₃ ·2H ₂ O	$KMgCl_3 \cdot 2H_2O$	-16,78
Kyanite	Al_2SiO_5	-22
Lanarkite	$Pb_2(SO_4)O$	-13,67
Larnite	Ca_2SiO_4	-41,63
Laumontite	$CaAl_2Si_4O_{12} \cdot 4H_2O$	-23,7
Lawrencite	$FeCl_2$	-21,01
Lawsonite	$CaAl_2Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$	-30,09
Leonite	$K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$	-3,15
Lime	CaO	-34,12
Litharge	PbO	-18,6
Magnetite	Fe_3O_4	-26,47
Manganite	$MnO(OH)$	-6,71
Manganosite	MnO	-21,1
Margarite	$CaAl_4Si_2O_{10}(OH)_2$	-54,32
Massicot	PbO	-18,79
Matlockite	$PbFCl$	-5,3
Maximum_Microcline	$KAlSi_3O_8$	-5,73
Mayenite	$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$	-549,28
Melanterite	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	-11,13
Mercallite	$KHSO_4$	-2
Merwinite	$MgCa_3(SiO_4)_2$	-74,81
Mesolite	$Na_{.676}Ca_{.657}Al_{1.99}Si_{3.01}O_{10} \cdot 2.647H_2O$	-22,03
Mg	Mg	-126,33
Mg(g)	Mg	-147,13
$Mg_{1.25}SO_4(OH)_{0.5} \cdot 0.5H_2O$	$Mg_{1.25}SO_4(OH)_{0.5} \cdot 0.5H_2O$	-9,34
$Mg_{1.5}SO_4(OH)$	$Mg_{1.5}SO_4(OH)$	-13,63
$MgCl_2 \cdot 2H_2O$	$MgCl_2 \cdot 2H_2O$	-14,8
$MgCl_2 \cdot 4H_2O$	$MgCl_2 \cdot 4H_2O$	-9,09

MgCl ₂ :H ₂ O	MgCl ₂ :H ₂ O	-18,3
MgOHCl	MgOHCl	-17,58
MgSO ₄	MgSO ₄	-8,83
Minium	Pb ₃ O ₄	-48,81
Minnesotaite	Fe ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-50,7
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ :10H ₂ O	-1,02
Misenite	K ₈ H ₆ (SO ₄) ₇	-13,33
Mn	Mn	-86,95
Mn(OH) ₂	Mn(OH) ₂	-18,36
Mn(OH) ₃	Mn(OH) ₃	-13,26
MnCl ₂ :2H ₂ O	MnCl ₂ :2H ₂ O	-7,64
MnCl ₂ :4H ₂ O	MnCl ₂ :4H ₂ O	-6,3
MnCl ₂ :H ₂ O	MnCl ₂ :H ₂ O	-9,27
MnO ₂ (gamma)	MnO ₂	-4,9
MnSO ₄	MnSO ₄	-8,43
Molysite	FeCl ₃	-18,21
Monticellite	CaMgSiO ₄	-32,67
Montmor-Ca	Ca _{1.165} Mg _{0.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-11,23
Montmor-K	K _{0.33} Mg _{0.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-10,88
Montmor-Mg	Mg _{0.495} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-11,16
Montmor-Na	Na _{0.33} Mg _{0.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-11,03
Mordenite	Ca _{0.2895} Na _{0.361} Al _{0.94} Si _{5.06} O ₁₂ :3.468H ₂ O	-2,67
Mordenite-dehy	Ca _{0.2895} Na _{0.361} Al _{0.94} Si _{5.06} O ₁₂	-18,43
Muscovite	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	-24,61
Na	Na	-1,51
Na(g)	Na	-68,85
Na ₂ O	Na ₂ O	-83,13
Mordenite	Ca _{0.2895} Na _{0.361} Al _{0.94} Si _{5.06} O ₁₂ :3.468H ₂ O	-69,32
Na ₂ SiO ₃	Na ₂ SiO ₃	-23,42
Na ₃ H(SO ₄) ₂	Na ₃ H(SO ₄) ₂	-4,21
Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ :2H ₂ O	Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ :2H ₂ O	-2,1
Na ₄ SiO ₄	Na ₄ SiO ₄	-72,94
Na ₆ Si ₂ O ₇	Na ₆ Si ₂ O ₇	-105,53
NaFeO ₂	NaFeO ₂	-22,82
Natrolite	Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ :2H ₂ O	-26,43
Natrosilite	Na ₂ Si ₂ O ₅	-20,34
Nepheline	NaAlSiO ₄	-17,39
NH ₃ (g)	NH ₃	-62,25
Niter	KNO ₃	-2,91
NO(g)	NO	-17,09
NO ₂ (g)	NO ₂	-10,97
Nontronite-Ca	Ca _{0.165} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	1,94
Nontronite-H	H _{0.33} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	2,97
Nontronite-K	K _{0.33} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	2,21

Nontronite-Mg	$\text{Mg}_{165}\text{Fe}_2\text{Al}_{33}\text{Si}_{3,67}\text{H}_2\text{O}_{12}$	1,93
Nontronite-Na	$\text{Na}_{33}\text{Fe}_2\text{Al}_{33}\text{Si}_{3,67}\text{H}_2\text{O}_{12}$	2,07
O ₂ (g)	O ₂	-1,1
Okenite	$\text{CaSi}_2\text{O}_4(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-13,24
Oxychloride-Mg	$\text{Mg}_2\text{Cl}(\text{OH})_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-27,1
Paragonite	$\text{NaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-28,07
Paralaurionite	PbClOH	-6,14
Pargasite	$\text{NaCa}_2\text{Al}_3\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-122,08
Pb	Pb	-52,75
Pb(g)	Pb	-82,61
Pb(N ₃) ₂ (mono)	Pb(N ₃) ₂	-170,28
Pb(N ₃) ₂ (orth)	Pb(N ₃) ₂	-169,83
Pb ₂ Cl ₅ NH ₄	Pb ₂ Cl ₅ NH ₄	-53,2
Pb ₂ O(N ₃) ₂	Pb ₂ O(N ₃) ₂	-170,97
Pb ₂ SiO ₄	Pb ₂ SiO ₄	-30,86
Pb ₃ SO ₆	Pb ₃ SO ₆	-30,63
Pb ₄ Cl ₂ (OH) ₆	Pb ₄ Cl ₂ (OH) ₆	-40,33
Pb ₄ SO ₇	Pb ₄ SO ₇	-47,66
PbF ₂	PbF ₂	-17,75
PbFCl	PbFCl	-5,48
PbSO ₄ (NH ₃) ₂	PbSO ₄ (NH ₃) ₂	-126,66
PbSO ₄ (NH ₃) ₄	PbSO ₄ (NH ₃) ₄	-250,55
Pentahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-2,12
Periclase	MgO	-22,71
Phlogopite	$\text{KAlMg}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-46,39
Picromerite	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-2,89
Plattnerite	PbO ₂	-13,64
Polyhalite	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,76
Portlandite	Ca(OH) ₂	-23,66
Prehnite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-42,64
Pseudowollastonite	CaSiO ₃	-15,96
Pyrite	FeS ₂	-230,4
Pyrolusite	MnO ₂	-2,76
Pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-9,64
Pyrrhotite	FeS	-146,53
Quartz	SiO ₂	2,98
Rankinite	Ca ₃ Si ₂ O ₇	-57
Rhodonite	MnSiO ₃	-13,75
Ripidolite-14A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-93,86
Ripidolite-7A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-97,34
S	S	-94,81
S ₂ (g)	S ₂	-204,47
Sanidine_high	KAlSi ₃ O ₈	-7,01
Saponite-Ca	$\text{Ca}_{165}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,86

Saponite-H	$\text{H}_{33}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-32,83
Saponite-K	$\text{K}_{33}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,59
Saponite-Mg	$\text{Mg}_{3,165}\text{Al}_{33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,87
Saponite-Na	$\text{Na}_{33}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-33,73
Scacchite	MnCl_2	-12,61
Scolecite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-24,76
Sellaite	MgF_2	-8,41
Sepiolite	$\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-40,49
Si	Si	-152,61
Si(g)	Si	-226,98
SiF ₄ (g)	SiF ₄	-21,22
Sillimanite	Al_2SiO_5	-22,69
SiO ₂ (am)	SiO ₂	1,6
Smectite-high-Fe-Mg	$\text{Ca}_{0,025}\text{Na}_{1,1}\text{K}_{0,2}\text{Fe}_{0,5}\text{Fe}_{0,2}\text{Mg}_{1,15}\text{Al}_{1,25}\text{Si}_{3,5}\text{H}_2\text{O}_{12}$	-31,35
Smectite-low-Fe-Mg	$\text{Ca}_{0,02}\text{Na}_{1,15}\text{K}_{0,2}\text{Fe}_{0,29}\text{Fe}_{0,16}\text{Mg}_{0,9}\text{Al}_{1,25}\text{Si}_{3,75}\text{H}_2\text{O}_{12}$	-22,55
SO ₂ (g)	SO ₂	-41,14
Sphalerite	ZnS	-131,47
Spinel	Al_2MgO_4	-44,22
Starkeyite	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-2,48
Stilbite	$\text{Ca}_{1,019}\text{Na}_{1,36}\text{K}_{0,06}\text{Al}_{2,18}\text{Si}_{6,82}\text{O}_{18} \cdot 7,33\text{H}_2\text{O}$	-14,27
Sylvite	KCl	-1,58
Syngenite	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0,6
Tachyhydrite	$\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	-21,36
Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-28,11
Tephroite	Mn_2SiO_4	-30,08
Thenardite	Na_2SO_4	-2,03
Tobermorite-11A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{11}\text{O}_{22,5}$	-76,06
Tobermorite-14A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{21}\text{O}_{27,5}$	-74,08
Tobermorite-9A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_6\text{O}_{20}$	-79,75
Todorokite	$\text{Mn}_7\text{O}_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-35,2
Tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-75,91
Tridymite	SiO ₂	2,79
Troilite	FeS	-146,42
Wairakite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	-28,42
Wollastonite	CaSiO_3	-15,7
Wurtzite	ZnS	-133,87
Wustite	$\text{Fe}_{0,947}\text{O}$	-22,04
Xonotlite	$\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$	-103,87
Zincite	ZnO	-15,14
Zn	Zn	-73,31
Zn(BO ₂) ₂	$\text{Zn}(\text{BO}_2)_2$	-13,99
Zn(ClO ₄) ₂ ·6H ₂ O	$\text{Zn}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-58,11
Zn(g)	Zn	-90,88
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-12,79

Zn(OH) ₂ (beta)	Zn(OH) ₂	-15,87
Zn(OH) ₂ (epsilon)	Zn(OH) ₂	-15,59
Zn(OH) ₂ (gamma)	Zn(OH) ₂	-15,2
Zn ₂ (OH) ₃ Cl	Zn ₂ (OH) ₃ Cl	-22,43
Zn ₂ SiO ₄	Zn ₂ SiO ₄	-22,58
Zn ₂ SO ₄ (OH) ₂	Zn ₂ SO ₄ (OH) ₂	-17,24
Zn ₃ O(SO ₄) ₂	Zn ₃ O(SO ₄) ₂	-36,93
Zn ₅ (NO ₃) ₂ (OH) ₈	Zn ₅ (NO ₃) ₂ (OH) ₈	-65,29
ZnCl ₂	ZnCl ₂	-11,92
ZnCl ₂ (NH ₃) ₂	ZnCl ₂ (NH ₃) ₂	-117,49
ZnCl ₂ (NH ₃) ₄	ZnCl ₂ (NH ₃) ₄	-237,96
ZnCl ₂ (NH ₃) ₆	ZnCl ₂ (NH ₃) ₆	-360,16
ZnF ₂	ZnF ₂	-20,72
ZnSO ₄	ZnSO ₄	-10,45
ZnSO ₄ ·6H ₂ O	ZnSO ₄ ·6H ₂ O	-4,87
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	-4,62
ZnSO ₄ ·H ₂ O	ZnSO ₄ ·H ₂ O	-6,14
Zoisite	Ca ₂ Al ₃ (SiO ₄) ₃ OH	-55,76

Especiación al agregar 0,02 M CaCO₃ al río Azufre.

Especie	Molaridad (M)	Actividad (M)
H ⁺	2,10E-02	1,71E-02
OH ⁻	3,03E-07	2,17E-07
AlSO ₄ ⁺	9,10E-02	6,64E-02
Al ⁺³	9,07E-02	1,20E-02
Al ₁₃ O ₄ (OH) ₂₄ ⁺⁷	5,86E-02	6,22E-08
Al(SO ₄) ₂ ⁻	3,82E-02	2,79E-02
AlOH ⁺²	1,20E-02	3,40E-03
AlF ⁺²	1,05E-02	2,99E-03
Al ₂ (OH) ₂ ⁺⁴	1,06E-03	9,95E-06
Al ₃ (OH) ₄ ⁺⁵	2,89E-04	2,61E-07
Al(OH) ₂ ⁺	2,77E-04	2,02E-04
AlF ₂ ⁺	4,07E-05	2,97E-05
HAIO ₂	7,87E-06	7,87E-06
AlO ₂ ⁻	1,16E-07	8,48E-08
AlF ₃	9,33E-09	9,33E-09
NaAlO ₂	5,09E-10	5,09E-10
AlF ₄ ⁻	8,01E-14	5,84E-14
Al total	1,01E+00	
B(OH) ₃	2,82E+00	2,82E+00
BO ₂ ⁻	9,28E-05	6,78E-05

CaB(OH) ₄ ⁺	9,19E-05	6,71E-05
MgB(OH) ₄ ⁺	3,81E-05	2,78E-05
NaB(OH) ₄	6,45E-06	6,45E-06
BF ₂ (OH) ₂ ⁻	1,71E-13	1,25E-13
B ₂ O(OH) ₅ ⁻	1,32E-16	9,62E-17
BF ₃ OH ⁻	5,62E-18	4,10E-18
BF ₄ ⁻	1,20E-26	8,72E-27
B(3) total	2,82E+00	
CO ₂	1,93E+01	2,03E+01
HCO ₃ ⁻	5,82E-01	4,25E-01
CaHCO ₃ ⁺	7,33E-02	5,35E-02
NaHCO ₃	2,83E-02	2,83E-02
MgHCO ₃ ⁺	2,48E-02	1,81E-02
FeCO ₃ ⁺	3,77E-03	2,75E-03
ZnHCO ₃ ⁺	6,12E-04	4,47E-04
MnHCO ₃ ⁺	2,16E-04	1,57E-04
CaCO ₃	1,60E-05	1,60E-05
PbCO ₃	6,30E-06	6,30E-06
CO ₃ ⁻²	3,00E-06	8,54E-07
MgCO ₃	2,85E-06	2,85E-06
MnCO ₃	1,88E-06	1,88E-06
ZnCO ₃	4,95E-07	4,95E-07
NaCO ₃ ⁻	2,05E-07	1,50E-07
FeHCO ₃ ⁺	9,94E-08	7,25E-08
FeCO ₃	2,04E-11	2,04E-11
Pb(CO ₃) ₂ ⁻²	1,81E-11	4,85E-12
SCN ⁻	0,00E+00	0,00E+00
PbSCN ⁺	0,00E+00	0,00E+00
Zn(SCN) ₂	0,00E+00	0,00E+00
Pb(SCN) ₂	0,00E+00	0,00E+00
Zn(SCN) ₄ ⁻²	0,00E+00	0,00E+00
C(4) total	2,00E+01	
Ca ⁺²	3,26E+01	1,08E+01
CaSO ₄	7,65E+00	7,65E+00
CaCl ⁺	2,27E-01	1,65E-01
CaHCO ₃ ⁺	7,33E-02	5,35E-02
CaNO ₃ ⁺	1,72E-02	1,26E-02
CaCl ₂	1,65E-02	1,65E-02
CaB(OH) ₄ ⁺	9,19E-05	6,71E-05
CaCO ₃	1,60E-05	1,60E-05
CaF ⁺	1,72E-06	1,25E-06
CaOH ⁺	1,22E-07	8,88E-08

Ca total	4,06E+01	0,00E+00
Cl ⁻	1,06E+02	7,45E+01
NaCl	4,42E-01	4,42E-01
MgCl ⁺	3,06E-01	2,23E-01
CaCl ⁺	2,27E-01	1,65E-01
CaCl ₂	1,65E-02	1,65E-02
KCl	1,43E-02	1,43E-02
MnCl ⁺	7,81E-03	5,70E-03
ZnCl ⁺	4,43E-03	3,23E-03
PbCl ⁺	3,87E-03	2,83E-03
PbCl ₂	7,50E-04	7,50E-04
ZnCl ₂	3,46E-04	3,46E-04
HCl	2,79E-04	2,79E-04
FeCl ²⁺	1,87E-04	1,37E-04
ZnCl ₄ ⁻²	4,77E-05	1,28E-05
PbCl ₃ ⁻	3,85E-05	2,81E-05
ZnCl ₃ ⁻	2,67E-05	1,95E-05
MnCl ₃ ⁻	1,28E-05	9,34E-06
Zn(OH)Cl	6,67E-06	6,67E-06
PbCl ₄ ⁻²	6,56E-06	1,76E-06
FeCl ⁺²	4,29E-06	1,22E-06
FeCl ⁺	2,31E-08	1,69E-08
PbCl ₄ ⁻²	1,25E-09	9,10E-10
FeCl ₂	6,34E-12	6,34E-12
FeCl ₄ ⁻²	3,76E-13	1,01E-13
Cl(-1) total	1,07E+02	
AlF ⁺²	1,05E-02	2,99E-03
AlF ₂ ⁺	4,07E-05	2,97E-05
F ⁻	3,47E-05	2,50E-05
MgF ⁺	3,00E-06	2,19E-06
CaF ⁺	1,72E-06	1,25E-06
HF	5,18E-07	5,18E-07
FeF ²⁺	1,89E-07	5,37E-08
NaF	8,68E-08	8,68E-08
MnF ⁺	4,48E-08	3,27E-08
ZnF ⁺	2,58E-08	1,89E-08
AlF ₃	9,33E-09	9,33E-09
PbF ⁺	3,27E-10	2,39E-10
FeF ₂ ⁺	2,52E-11	1,84E-11
FeF ⁺	2,55E-13	1,86E-13
BF ₂ (OH) ₂ ⁻	1,71E-13	1,25E-13
AlF ₄ ⁻	8,01E-14	5,84E-14

HF ₂ ⁻	3,77E-15	2,76E-15
H ₂ F ₂	1,07E-15	1,07E-15
PbF ₂	3,63E-17	3,63E-17
BF ₃ OH ⁻	5,62E-18	4,10E-18
BF ₄ ⁻	1,20E-26	8,72E-27
SiF ₆ ⁻²	1,59E-37	0,00E+00
F total	1,06E-02	
Fe ⁺²	9,83E-07	3,25E-07
FeSO ₄	2,79E-07	2,79E-07
FeHCO ₃ ⁺	9,94E-08	7,25E-08
FeCl ⁺	2,31E-08	1,69E-08
FeCO ₃	2,04E-11	2,04E-11
FeOH ⁺	8,21E-12	6,00E-12
FeCl ₂	6,34E-12	6,34E-12
FeCl ₄ ⁻²	3,76E-13	1,01E-13
FeF ⁺	2,55E-13	1,86E-13
Fe(OH) ₂	2,77E-18	2,77E-18
Fe(OH) ₃ ⁻	8,82E-24	6,44E-24
Fe(OH) ₄ ⁻²	1,40E-33	3,75E-34
Fe(2) total	1,38E-06	
Fe(OH) ₂ ⁺	1,82E+00	1,33E+00
FeOH ⁺²	2,42E-01	6,87E-02
Fe ₃ (OH) ₄ ⁺⁵	3,89E-02	3,52E-05
Fe(OH) ₃	3,61E-02	3,61E-02
Fe ₂ (OH) ₂ ⁺⁴	1,35E-02	1,27E-04
FeCO ₃ ⁺	3,77E-03	2,75E-03
Fe ⁺³	1,38E-03	1,83E-04
FeCl ⁺²	1,87E-04	1,37E-04
FeSO ₄ ⁺	8,33E-05	6,08E-05
Fe(SO ₄) ₂ ⁻	1,20E-05	8,76E-06
FeCl ₂ ⁺	4,29E-06	1,22E-06
FeNO ₃ ⁺²	1,49E-06	4,25E-07
Fe(OH) ₄ ⁻	7,24E-07	5,29E-07
FeF ²⁺	1,89E-07	5,37E-08
FeCl ₄ ⁻	1,25E-09	9,10E-10
FeF ₂ ⁺	2,52E-11	1,84E-11
FeNO ₂ ⁺²	5,51E-17	1,57E-17
Fe(3) total	2,24E+00	
K ⁺	1,04E+01	7,36E+00
KSO ₄ ⁻	4,20E-01	3,06E-01
KCl	1,43E-02	1,43E-02
KHSO ₄	2,95E-06	2,95E-06

KOH	1,49E-09	1,49E-09
K total	1,09E+01	
Mg ⁺²	9,72E+00	3,76E+00
MgSO ₄	3,96E+00	3,96E+00
MgCl ⁺	3,06E-01	2,23E-01
MgHCO ₃ ⁺	2,48E-02	1,81E-02
MgB(OH) ₄ ⁺	3,81E-05	2,78E-05
MgF ⁺	3,00E-06	2,19E-06
MgCO ₃	2,85E-06	2,85E-06
Mg ₄ (OH) ₄ ⁺⁴	4,32E-26	4,07E-28
Mg total	1,40E+01	
Mn ⁺²	1,47E-01	4,87E-02
MnSO ₄	5,46E-02	5,46E-02
MnCl ⁺	7,81E-03	5,70E-03
MnHCO ₃ ⁺	2,16E-04	1,57E-04
MnNO ₃ ⁺	2,46E-05	1,79E-05
MnCl ₃ ⁻	1,28E-05	9,34E-06
MnCO ₃	1,88E-06	1,88E-06
MnOH ⁺	9,98E-08	7,29E-08
MnF ⁺	4,48E-08	3,27E-08
Mn(NO ₃) ₂	1,05E-08	1,05E-08
Mn ₂ OH ⁺³	5,82E-11	3,80E-12
Mn(OH) ₂	1,04E-14	1,04E-14
Mn ₂ (OH) ₃ ⁺	8,07E-16	5,89E-16
Mn(OH) ₃ ⁻	7,80E-22	5,70E-22
Mn(OH) ₄ ⁻²	1,05E-30	2,81E-31
Mn(2) total	2,10E-01	
NO ₃ ⁻	3,30E-01	2,33E-01
CaNO ₃ ⁺	1,72E-02	1,26E-02
MnNO ₃ ⁺	2,46E-05	1,79E-05
PbNO ₃ ⁺	7,64E-06	5,57E-06
FeNO ₃ ⁺²	1,49E-06	4,25E-07
HNO ₃	1,56E-07	1,56E-07
Mn(NO ₃) ₂	1,05E-08	1,05E-08
N(5) total	3,47E-01	
Na ⁺	5,07E+01	3,70E+01
NaSO ₄ ⁻	1,81E+00	1,32E+00
NaCl	4,42E-01	4,42E-01
NaHCO ₃	2,83E-02	2,83E-02
NaHSiO ₃	2,43E-05	2,43E-05
NaB(OH) ₄	6,45E-06	6,45E-06
NaCO ₃ ⁻	2,05E-07	1,50E-07

NaF	8,68E-08	8,68E-08
NaOH	1,43E-09	1,43E-09
NaAlO ₂	5,09E-10	5,09E-10
Na total	5,29E+01	
Pb ⁺²	5,00E-03	1,42E-03
PbCl ⁺	3,87E-03	2,83E-03
PbCl ₂	7,50E-04	7,50E-04
PbCl ₃ ⁻	3,85E-05	2,81E-05
PbNO ₃ ⁺	7,64E-06	5,57E-06
PbCl ₄ ⁻²	6,56E-06	1,76E-06
PbCO ₃	6,30E-06	6,30E-06
PbOH ⁺	2,29E-06	1,67E-06
Pb ₂ OH ⁺³	7,26E-10	4,74E-11
PbF ⁺	3,27E-10	2,39E-10
Pb(OH) ₂	3,92E-11	3,92E-11
Pb(CO ₃) ₂ ⁻²	1,81E-11	4,85E-12
PbF ₂	3,63E-17	3,63E-17
Pb(OH) ₃ ⁻	3,16E-17	2,31E-17
Pb ₃ (OH) ₄ ⁺²	1,53E-19	4,36E-20
Pb ₄ (OH) ₄ ⁺⁴	6,57E-21	6,19E-23
PbClO ₃ ⁺	1,02E-32	7,41E-33
Pb ₆ (OH) ₈ ⁺⁴	3,19E-36	0,00E+00
Pb(ClO ₃) ₂	0,00E+00	0,00E+00
PbSCN ⁺	0,00E+00	0,00E+00
Pb(SCN) ₂	0,00E+00	0,00E+00
Pb(2) total	9,68E-03	
SO ₄ ⁻²	2,02E+01	5,42E+00
CaSO ₄	7,65E+00	7,65E+00
MgSO ₄	3,96E+00	3,96E+00
NaSO ₄ ⁻	1,81E+00	1,32E+00
KSO ₄ ⁻	4,20E-01	3,06E-01
AlSO ₄ ⁺	9,10E-02	6,64E-02
MnSO ₄	5,46E-02	5,46E-02
ZnSO ₄	4,77E-02	4,77E-02
Al(SO ₄) ₂ ⁻	3,82E-02	2,79E-02
HSO ₄ ⁻	9,14E-03	6,67E-03
FeSO ₄ ⁺	8,33E-05	6,08E-05
Fe(SO ₄) ₂ ⁻	1,20E-05	8,76E-06
KHSO ₄	2,95E-06	2,95E-06
FeSO ₄	2,79E-07	2,79E-07
H ₂ SO ₄	1,51E-10	1,51E-10
NH ₄ SO ₄ ⁻	0.00E+00	0.00E+00

S(6) total	3,43E+01	
SiO ₂	2,51E+00	2,51E+00
NaHSiO ₃	2,43E-05	2,43E-05
HSiO ₃ ⁻	1,51E-05	1,10E-05
H ₆ (H ₂ SiO ₄) ₄ ⁻²	1,12E-11	3,00E-12
H ₂ SiO ₄ ⁻²	3,49E-13	9,34E-14
H ₄ (H ₂ SiO ₄) ₄ ⁻⁴	1,06E-22	5,16E-25
SiF ₆ ⁻²	1,59E-37	0,00E+00
Si total	2,51E+00	
Zn ⁺²	1,62E-01	5,35E-02
ZnSO ₄	4,77E-02	4,77E-02
ZnCl ⁺	4,43E-03	3,23E-03
ZnHCO ₃ ⁺	6,12E-04	4,47E-04
ZnCl ₂	3,46E-04	3,46E-04
ZnCl ₄ ⁻²	4,77E-05	1,28E-05
ZnCl ₃ ⁻	2,67E-05	1,95E-05
Zn(OH)Cl	6,67E-06	6,67E-06
ZnOH ⁺	1,82E-06	1,33E-06
ZnCO ₃	4,95E-07	4,95E-07
ZnF ⁺	2,58E-08	1,89E-08
Zn(OH) ₂	8,53E-10	8,53E-10
Zn(OH) ₃ ⁻	2,11E-16	1,54E-16
Zn(OH) ₄ ⁻²	5,71E-24	1,53E-24
ZnClO ₄ ⁺	2,57E-31	1,88E-31
Zn(NH ₃) ⁺²	0,00E+00	0,00E+00
ZnN ₃ ⁺	0,00E+00	0,00E+00
Zn(NH ₃) ₂ ⁺²	0,00E+00	0,00E+00
Zn(NH ₃) ₃ ⁺²	0,00E+00	0,00E+00
Zn(N ₃) ₂	0,00E+00	0,00E+00
Zn(NH ₃) ₄ ⁺²	0,00E+00	0,00E+00
Zn(SCN) ₂	0,00E+00	0,00E+00
Zn(CN) ₄ ⁻²	0,00E+00	0,00E+00
Zn(SCN) ₄ ⁻²	0,00E+00	0,00E+00
Zn total	2,15E-01	

Índice de saturación de minerales al agregar 0,02 M CaCO₃ al río Azufre (pH=4,77).

Nombre		SI
Afwillite	Ca ₃ Si ₂ O ₄ (OH) ₆	-44,78
Akermanite	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	-30,29
Al	Al	-142,54
Al(g)	Al	-195,66

Al ₂ (SO ₄) ₃	Al ₂ (SO ₄) ₃	-38,21
Al ₂ (SO ₄) ₃ :6H ₂ O	Al ₂ (SO ₄) ₃ :6H ₂ O	-19,75
Alabandite	MnS	-137,57
Alamosite	PbSiO ₃	-4,67
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	1,91
Albite_high	NaAlSi ₃ O ₈	0,51
Albite_low	NaAlSi ₃ O ₈	1,91
AlF ₃	AlF ₃	-10,72
Alum-K	KAl(SO ₄) ₂ :12H ₂ O	-6,55
Alunite	KAl ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	5,93
Amesite-14A	Mg ₄ Al ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₈	-20,4
Analcime	Na ₉₆ Al ₉₆ Si _{2,04} O ₆ :H ₂ O	0,3
Analcime-dehy	Na ₉₆ Al ₉₆ Si _{2,04} O ₆	-6,36
Andalusite	Al ₂ SiO ₅	-1,44
Andradite	Ca ₃ Fe ₂ (SiO ₄) ₃	-5,35
Anglesite	PbSO ₄	-0,12
Anhydrite	CaSO ₄	-0,02
Annite	KFe ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	-26,86
Anorthite	CaAl ₂ (SiO ₄) ₂	-7,56
Antarcticite	CaCl ₂ :6H ₂ O	-8,33
Anthophyllite	Mg ₇ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	-40,99
Antigorite	Mg ₄₈ Si ₃₄ O ₈₅ (OH) ₆₂	-247,41
Aphthitalite	NaK ₃ (SO ₄) ₂	-8,48
Aragonite	CaCO ₃	-2,73
Arcanite	K ₂ SO ₄	-4,51
Artinite	Mg ₂ CO ₃ (OH) ₂ :3H ₂ O	-14,53
B	B	-111,74
B(g)	B	-207,18
B ₂ O ₃	B ₂ O ₃	-10,76
Bassanite	CaSO ₄ :0.5H ₂ O	-0,67
Beidellite-Ca	Ca ₁₆₅ Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	6,96
Beidellite-H	H ₃₃ Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	6,73
Beidellite-K	K ₃₃ Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	6,95
Beidellite-Mg	Mg ₁₆₅ Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	6,9
Beidellite-Na	Na ³³ Al _{2,33} Si _{3,67} O ₁₀ (OH) ₂	6,81
BF ₃ (g)	BF ₃	-37,29
Birnessite	Mn ₈ O ₁₄ :5H ₂ O	6,48
Bischofite	MgCl ₂ :6H ₂ O	-9,09
Bixbyite	Mn ₂ O ₃	-0,55
Bloedite	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ :4H ₂ O	-7,35
Boehmite	AlO ₂ H	0,99
Borax	Na ₂ (B ₄ O ₅ (OH) ₄):8H ₂ O	-14,99
Boric_acid	B(OH) ₃	-2,24
Brucite	Mg(OH) ₂	-10

Burkeite	$\text{Na}_6\text{CO}_3(\text{SO}_4)_2$	-21,22
C	C	-68,45
C(g)	C	-191,33
Ca	Ca	-134,96
Ca(g)	Ca	-161,5
Ca-Al Pyroxene	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$	-14,83
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-25,7
$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-22,95
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	-77,7
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	-84,72
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-58,26
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	-54,7
$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-49,89
CaAl_2O_4	CaAl_2O_4	-23,8
$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-11,69
CaAl_4O_7	CaAl_4O_7	-28,79
Calcite	CaCO_3	-2,59
Carnallite	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-12,23
$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (beta)	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	-0,85
Celadonite	$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	0,91
Cerussite	PbCO_3	-1,11
CH_4 (g)	CH_4	-142,42
Chalcedony	SiO_2	1,4
Chamosite-7A	$\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$	-19,19
Chloromagnesite	MgCl_2	-27,67
Chrysotile	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-16,5
Cl_2 (g)	Cl_2	-18,53
Clinochlore-14A	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-25,06
Clinochlore-7A	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-28,53
Clinoptilolite-Ca	$\text{Ca}_{1.7335}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36} \cdot 10.922\text{H}_2\text{O}$	14,94
Clinoptilolite-dehy-Ca	$\text{Ca}_{1.7335}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36}$	-22,55
Clinoptilolite-dehy-K	$\text{K}_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36}$	-21,58
Clinoptilolite-dehy-Na	$\text{Na}_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36}$	-23,42
Clinoptilolite-dehy-NH4-206.11	$(\text{NH}_4)_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36}$	-212,95
Clinoptilolite-hy-Ca	$\text{Ca}_{1.7335}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36} \cdot 11.645\text{H}_2\text{O}$	15,01
Clinoptilolite-hy-K	$\text{K}_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36} \cdot 7.499\text{H}_2\text{O}$	15,67
Clinoptilolite-hy-Na	$\text{Na}_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36} \cdot 10.877\text{H}_2\text{O}$	14,07
Clinoptilolite-K	$\text{K}_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36} \cdot 10.922\text{H}_2\text{O}$	15,93
Clinoptilolite-Na	$\text{Na}_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36} \cdot 10.922\text{H}_2\text{O}$	14,07
Clinoptilolite-NH4-170.50	$(\text{NH}_4)_{3.467}\text{Al}_{3.45}\text{Fe}_{.017}\text{Si}_{14.533}\text{O}_{36} \cdot 10.922\text{H}_2\text{O}$	-212,98
Clinzoisite	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	-10,97
CO(g)	CO	-45,57
$\text{CO}_2(\text{g})$	CO_2	-0,39

Coesite	SiO ₂	0,84
Colemanite	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	-21,67
Cordierite_anhyd	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	-17,89
Cordierite_hydr	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ ·H ₂ O	-15,28
Corundum	Al ₂ O ₃	-1,42
Cotunnite	PbCl ₂	-3,05
Cristobalite(alpha)	SiO ₂	1,11
Cronstedtite-7A	Fe ₂ Fe ₂ SiO ₅ (OH) ₄	0,63
Daphnite-14A	Fe ₅ AlAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-5,36
Daphnite-7A	Fe ₅ AlAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-44,72
Cronstedtite-7A	Fe ₂ Fe ₂ SiO ₅ (OH) ₄	-48,2
Dawsonite	NaAlCO ₃ (OH) ₂	-0,33
Diaspore	AlHO ₂	1,42
Dicalcium_silicate	Ca ₂ SiO ₄	-26,19
Diopside	CaMgSi ₂ O ₆	-12,37
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	-4,52
Dolomite-dis	CaMg(CO ₃) ₂	-6,15
Dolomite-ord	CaMg(CO ₃) ₂	-4,51
Enstatite	MgSiO ₃	-7,38
Epidote	Ca ₂ FeAl ₂ Si ₃ O ₁₂ OH	-1,93
Epidote-ord	FeCa ₂ Al ₂ (OH)(SiO ₄) ₃	-1,93
Epsomite	MgSO ₄ ·7H ₂ O	-2,74
Ettringite	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·26H ₂ O	-36,66
F ₂ (g)	F ₂	-86,66
Fayalite	Fe ₂ SiO ₄	-22,68
Fe	Fe	-58,35
Fe(OH) ₂	Fe(OH) ₂	-14,56
Fe(OH) ₃	Fe(OH) ₃	1,3
Fe ₂ (SO ₄) ₃	Fe ₂ (SO ₄) ₃	-25,16
FeF ₂	FeF ₂	-22,65
FeF ₃	FeF ₃	-10,37
FeO	FeO	-14,26
Ferrite-Ca	CaFe ₂ O ₄	-0,76
Ferrite-Dicalcium	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	-30,04
Ferrite-Mg	MgFe ₂ O ₄	-0,85
Ferrite-Zn	ZnFe ₂ O ₄	7,01
Ferrosilite	FeSiO ₃	-10,37
FeSO ₄	FeSO ₄	-14,9
Fluorite	CaF ₂	-7,02
Forsterite	Mg ₂ SiO ₄	-17,7
Foshagite	Ca ₄ Si ₃ O ₉ (OH) ₂ ·0.5H ₂ O	-45,95
Galena	PbS	-123,86
Gaylussite	CaNa ₂ (CO ₃) ₂ ·5H ₂ O	-13,21
Gehlenite	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	-28,53

Gibbsite	Al(OH)_3	0,88
Gismondine	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	0,51
Glauberite	$\text{Na}_2\text{Ca(SO}_4)_2$	-3,89
Goethite	FeOOH	6,57
Greenalite	$\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-28,85
Grossular	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	-21,27
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,28
Gyrolite	$\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$	-16,05
H_2 (g)	H_2	-41,7
H_2O (g)	H_2O	-1,91
H_2S (g)	H_2S	-135,01
Halite	NaCl	-4,1
Hatrurite	Ca_3SiO_5	-56,44
Hausmannite	Mn_3O_4	-7,01
HCl(g)	HCl	-12,74
Hedenbergite	$\text{CaFe(SiO}_3)_2$	-18,01
Hematite	Fe_2O_3	14,09
Hercynite	FeAl_2O_4	-12,55
Hexahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-2,98
Hillebrandite	$\text{Ca}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2 \cdot 0.17\text{H}_2\text{O}$	-25,73
Huntite	$\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$	-15,15
Hydroboracite	$\text{MgCaB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-20,98
Hydrocerussite	$\text{Pb}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	-7,07
Hydromagnesite	$\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-29,99
Hydrophilite	CaCl_2	-16,57
Ice	H_2O	-20,28
Illite	$\text{K}_{0.6}\text{Mg}_{0.25}\text{Al}_{1.8}\text{Al}_{0.5}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-0,09
Jadeite	$\text{NaAl(SiO}_3)_2$	5,73
Jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	-1,39
Jarosite-Na	$\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	9,74
Hydrophilite	CaCl_2	7,86
K	K	-69,55
K(g)	K	-80,8
K-Feldspar	KAlSi_3O_8	4,46
$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$	-16,25
K_2O	K_2O	-81,9
$\text{K}_3\text{H(SO}_4)_2$	$\text{K}_3\text{H(SO}_4)_2$	-12,08
$\text{K}_8\text{H}_4(\text{CO}_3)_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{K}_8\text{H}_4(\text{CO}_3)_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-55,48
Kainite	$\text{KMgClSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-7,65
$\text{KAl(SO}_4)_2$	$\text{KAl(SO}_4)_2$	-15,88
Kalinite	KHCO_3	-5,79
Kalsilite	KAlSiO_4	-2,22
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	5,74
Katoite	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{H}_{12}\text{O}_{12}$	-37,5

Kieserite	MgSO ₄ ·H ₂ O	-4,43
KMgCl ₃	KMgCl ₃	-30,15
KMgCl ₃ ·2H ₂ O	KMgCl ₃ ·2H ₂ O	-22,46
KNaCO ₃ ·6H ₂ O	KNaCO ₃ ·6H ₂ O	-12,44
Kyanite	Al ₂ SiO ₅	-1,14
Lanarkite	Pb ₂ (SO ₄)O	-4,09
Lansfordite	MgCO ₃ ·5H ₂ O	-5,88
Larnite	Ca ₂ SiO ₄	-27,55
Laumontite	CaAl ₂ Si ₄ O ₁₂ ·4H ₂ O	1,09
Lawrencite	FeCl ₂	-21,42
Lawsonite	CaAl ₂ Si ₂ O ₇ (OH) ₂ ·H ₂ O	-2,77
Leonite	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·4H ₂ O	-7,12
Lime	CaO	-26,43
Litharge	PbO	-9,43
Magnesite	MgCO ₃	-3,63
Magnetite	Fe ₃ O ₄	3,15
Manganite	MnO(OH)	0,11
Manganosite	MnO	-13,59
Margarite	CaAl ₄ Si ₂ O ₁₀ (OH) ₂	-4,87
Massicot	PbO	-9,63
Matlockite	PbFCl	-5,15
Maximum_Microcline	KAlSi ₃ O ₈	4,46
Mayenite	Ca ₁₂ Al ₁₄ O ₃₃	-301,88
Melanterite	FeSO ₄ ·7H ₂ O	-9,3
Mercallite	KHSO ₄	-7,73
Merwinite	MgCa ₃ (SiO ₄) ₂	-46,95
Mesolite	Na _{0,676} Ca _{0,657} Al _{1,99} Si _{3,01} O ₁₀ ·2.647H ₂ O	3,28
Mg	Mg	-117,54
Mg(g)	Mg	-138,34
Mg _{1,25} SO ₄ (OH) _{0,5} ·0.5H ₂ O	Mg _{1,25} SO ₄ (OH) _{0,5} ·0.5H ₂ O	-8,83
Mg _{1,5} SO ₄ (OH)	Mg _{1,5} SO ₄ (OH)	-11,28
MgCl ₂ ·2H ₂ O	MgCl ₂ ·2H ₂ O	-18,1
MgCl ₂ ·4H ₂ O	MgCl ₂ ·4H ₂ O	-12,33
MgCl ₂ ·H ₂ O	MgCl ₂ ·H ₂ O	-21,64
MgOHCl	MgOHCl	-15,56
MgSO ₄	MgSO ₄	-10,19
Minium	Pb ₃ O ₄	-22,73
Minnesotaite	Fe ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	-24,83
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	-3,44
Misenite	K ₈ H ₆ (SO ₄) ₇	-50,46
Mn	Mn	-78,04
Mn(OH) ₂ (am)	Mn(OH) ₂	-10,81
Mn(OH) ₃	Mn(OH) ₃	-6,4
MnCl ₂ ·2H ₂ O	MnCl ₂ ·2H ₂ O	-10,82

MnCl ₂ ·4H ₂ O	MnCl ₂ ·4H ₂ O	-9,41
MnCl ₂ ·H ₂ O	MnCl ₂ ·H ₂ O	-12,48
MnO ₂ (gamma)	MnO ₂	1,21
MnSO ₄	MnSO ₄	-9,67
Molysite	FeCl ₃	-24,7
Monohydrocalcite	CaCO ₃ ·H ₂ O	-3,4
Monticellite	CaMgSiO ₄	-18,89
Montmor-Ca	Ca _{1.65} Mg _{0.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	5,82
Montmor-K	K _{0.33} Mg _{0.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	5,89
Montmor-Mg	Mg _{0.495} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	5,84
Montmor-Na	Na _{0.33} Mg _{0.33} Al _{1.67} Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	5,74
Mordenite	Ca _{0.2895} Na _{0.361} Al _{0.94} Si _{5.06} O ₁₂ ·3.468H ₂ O	4,6
Mordenite-dehy	Ca _{0.2895} Na _{0.361} Al _{0.94} Si _{5.06} O ₁₂	-11,28
Muscovite	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	7,77
N ₂ (g)	N ₂	-5,24
Na	Na	-65,15
Na(g)	Na	-79,43
Na ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃	-12,93
Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O	Na ₂ CO ₃ ·7H ₂ O	-11,24
Na ₂ O	Na ₂ O	-63,34
Mordenite	Ca _{0.2895} Na _{0.361} Al _{0.94} Si _{5.06} O ₁₂ ·3.468H ₂ O	-18,73
Na ₂ SiO ₃	Na ₂ SiO ₃	-12,71
Na ₃ H(SO ₄) ₂	Na ₃ H(SO ₄) ₂	-8,6
Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ ·2H ₂ O	Na ₄ Ca(SO ₄) ₃ ·2H ₂ O	-62,27
Na ₄ SiO ₄	Na ₄ SiO ₄	-90,18
NaFeO ₂	NaFeO ₂	-10,19
Nahcolite	NaHCO ₃	-4,55
Natrolite	Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ ·2H ₂ O	-2,12
Natron	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	-10,73
Natrosilite	Na ₂ Si ₂ O ₅	-16,95
Nepheline	NaAlSiO ₄	-4,62
Nesquehonite	MgCO ₃ ·3H ₂ O	-6,71
NH ₃ (g)	NH ₃	-61,95
Niter	KNO ₃	-5,28
NO(g)	NO	-20,35
NO ₂ (g)	NO ₂	-15,64
Nontronite-Ca	Ca _{0.165} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	21,42
Nontronite-H	H _{0.33} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	21,19
Nontronite-K	K _{0.33} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	21,4
Nontronite-Mg	Mg _{0.165} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	21,36
Nontronite-Na	Na _{0.33} Fe ₂ Al _{0.33} Si _{3.67} H ₂ O ₁₂	21,26
O ₂ (g)	O ₂	-3,91
Okenite	CaSi ₂ O ₄ (OH) ₂ ·H ₂ O	-8,08
Oxychloride-Mg	Mg ₂ Cl(OH) ₃ ·4H ₂ O	-17,52

Paragonite	$\text{NaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	4,3
Paralaurionite	PbClOH	-2,34
Pargasite	$\text{NaCa}_2\text{Al}_3\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-48,68
Pb	Pb	-42,18
Pb(g)	Pb	-72,04
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ (mono)	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	-170,88
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ (orth)	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	-170,42
$\text{Pb}(\text{SCN})_2$	$\text{Pb}(\text{SCN})_2$	-412,34
$\text{Pb}_2\text{Cl}_2\text{CO}_3$	$\text{Pb}_2\text{Cl}_2\text{CO}_3$	-2,94
$\text{Pb}_2\text{Cl}_5\text{NH}_4$	$\text{Pb}_2\text{Cl}_5\text{NH}_4$	-61,45
$\text{Pb}_2\text{O}(\text{N}_3)_2$	$\text{Pb}_2\text{O}(\text{N}_3)_2$	-162,41
Pb_2SiO_4	Pb_2SiO_4	-13,83
Pb_3SO_6	Pb_3SO_6	-11,89
$\text{Pb}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6$	$\text{Pb}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6$	-14,33
Pb_4SO_7	Pb_4SO_7	-19,76
$\text{PbCO}_3 \cdot \text{PbO}$	$\text{PbCO}_3 \cdot \text{PbO}$	-10,83
PbF_2	PbF_2	-15,84
PbFCl	PbFCl	-5,33
$\text{PbSO}_4(\text{NH}_3)_2$	$\text{PbSO}_4(\text{NH}_3)_2$	-125,65
$\text{PbSO}_4(\text{NH}_3)_4$	$\text{PbSO}_4(\text{NH}_3)_4$	-248,94
Pentahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-3,31
Periclase	MgO	-15,32
Phlogopite	$\text{KAlMg}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-14,02
Phosgenite	$\text{Pb}_2(\text{CO}_3)\text{Cl}_2$	-2,52
Picromerite	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-6,8
Pirssonite	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-13,37
Plattnerite	PbO_2	-5,88
Polyhalite	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-5,38
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-15,93
Prehnite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-8,96
Pseudowollastonite	CaSiO_3	-9,57
Pyrite	FeS_2	-227,71
Pyrolusite	MnO_2	3,35
Pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	7,37
Pyrrhotite	FeS	-139,31
Quartz	SiO_2	1,68
Rankinite	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$	-36,53
Rhodochrosite	MnCO_3	-2,86
Rhodonite	MnSiO_3	-7,53
Ripidolite-14A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-32,62
Ripidolite-7A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-36,1
S	S	-99,34
S_2 (g)	S_2	-213,52
Sanidine_high	KAlSi_3O_8	3,18

Saponite-Ca	$\text{Ca}_{1.65}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-11,51
Saponite-H	$\text{H}_{33}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-11,75
Saponite-K	$\text{K}_{33}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-11,52
Saponite-Mg	$\text{Mg}_{3.165}\text{Al}_{33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-11,57
Saponite-Na	$\text{Na}_{33}\text{Mg}_3\text{Al}_{33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-11,67
Scacchite	MnCl_2	-15,85
Scolecite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	1,3
Sellaite	MgF_2	-8,28
Sepiolite	$\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-18,5
Si	Si	-151,1
Si(g)	Si	-225,47
Siderite	FeCO_3	-8,11
SiF ₄ (g)	SiF_4	-37,03
Sillimanite	Al_2SiO_5	-1,83
SiO ₂ (am)	SiO_2	0,3
Smectite-high-Fe-Mg	$\text{Ca}_{0.025}\text{Na}_{1.1}\text{K}_{2.5}\text{Fe}_{.5}\text{Fe}_{.2}\text{Mg}_{1.15}\text{Al}_{1.25}\text{Si}_{3.5}\text{H}_2\text{O}_{12}$	-5,32
Smectite-low-Fe-Mg	$\text{Ca}_{0.2}\text{Na}_{1.5}\text{K}_{2.5}\text{Fe}_{.29}\text{Fe}_{.16}\text{Mg}_{.9}\text{Al}_{1.25}\text{Si}_{3.75}\text{H}_2\text{O}_{12}$	-1,14
Smithsonite	ZnCO_3	-3,55
SO ₂ (g)	SO_2	-48,48
Sphalerite	ZnS	-126,05
Spinel	Al_2MgO_4	-14,67
Starkeyite	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-3,7
Stilbite	$\text{Ca}_{1.019}\text{Na}_{1.136}\text{K}_{.006}\text{Al}_{2.18}\text{Si}_{6.82}\text{O}_{18} \cdot 7.33\text{H}_2\text{O}$	9,54
Sylvite	KCl	-3,96
Syngenite	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-3,17
Tachyhydrite	$\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	-30,75
Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-11,11
Tephroite	Mn_2SiO_4	-16,36
Thenardite	Na_2SO_4	-4,79
Thermonatrite	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-12,62
Tobermorite-11A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{11}\text{O}_{22.5}$	-45,22
Tobermorite-14A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{21}\text{O}_{27.5}$	-43,06
Tobermorite-9A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_6\text{O}_{20}$	-48,99
Todorokite	$\text{Mn}_7\text{O}_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	10,46
Tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-33,96
Tridymite	SiO_2	1,49
Troilite	FeS	-139,2
Trona-K	$\text{K}_2\text{NaH}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-19,27
Wairakite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	-3,7
Wollastonite	CaSiO_3	-9,31
Wurtzite	ZnS	-128,44
Wustite	$\text{Fe}_{.947}\text{O}$	-12,32
Xonotlite	$\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$	-65,49
Zincite	ZnO	-6,59

Zn	Zn	-63,36
Zn(BO ₂) ₂	Zn(BO ₂) ₂	-8,14
Zn(ClO ₄) ₂ ·6H ₂ O	Zn(ClO ₄) ₂ ·6H ₂ O	-71,35
Zn(g)	Zn	-80,93
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	-14,78
Zn(OH) ₂ (beta)	Zn(OH) ₂	-7,29
Zn(OH) ₂ (epsilon)	Zn(OH) ₂	-7,01
Zn(OH) ₂ (gamma)	Zn(OH) ₂	-6,62
Zn ₂ (OH) ₃ Cl	Zn ₂ (OH) ₃ Cl	-10,67
Zn ₂ SiO ₄	Zn ₂ SiO ₄	-6,79
Zn ₂ SO ₄ (OH) ₂	Zn ₂ SO ₄ (OH) ₂	-8,86
Zn ₃ O(SO ₄) ₂	Zn ₃ O(SO ₄) ₂	-28,78
Zn ₅ (NO ₃) ₂ (OH) ₈	Zn ₅ (NO ₃) ₂ (OH) ₈	-33,17
ZnCl ₂	ZnCl ₂	-14,13
ZnCl ₂ (NH ₃) ₂	ZnCl ₂ (NH ₃) ₂	-119,1
ZnCl ₂ (NH ₃) ₄	ZnCl ₂ (NH ₃) ₄	-238,98
ZnCl ₂ (NH ₃) ₆	ZnCl ₂ (NH ₃) ₆	-360,58
ZnF ₂	ZnF ₂	-3,02
ZnSO ₄	ZnSO ₄	-19,43
ZnSO ₄ ·6H ₂ O	ZnSO ₄ ·6H ₂ O	-10,65
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	-4,86
ZnSO ₄ ·H ₂ O	ZnSO ₄ ·H ₂ O	-4,58
Zoisite	Ca ₂ Al ₃ (SiO ₄) ₃ OH	-6,3
ZnCl ₂	ZnCl ₂	-55,76

Especiación de río Colpitas.

Especie	Molaridad (M)	Actividad (M)
OH ⁻	9.55E-04	8.12E-04
H ⁺	8.43E-06	7.41E-06
AlO ₂ ⁻	1.52E-02	1.30E-02
HAIO ₂	3.81E-04	3.81E-04
NaAlO ₂	3.18E-05	3.18E-05
Al(OH) ₂ ⁺	3.36E-06	2.86E-06
AlOH ⁺²	2.58E-08	1.38E-08
AlF ₂ ⁺	2.01E-08	1.71E-08
AlF ⁺²	4.57E-09	2.44E-09
AlF ₃	3.81E-09	3.81E-09
Al ⁺³	4.51E-11	1.39E-11
AlF ₄ ⁻	1.98E-11	1.69E-11
AlSO ₄ ⁺	1.78E-11	1.52E-11
Al(SO ₄) ₂ ⁻	1.48E-12	1.26E-12

$\text{Al}_3\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{+7}$	2.52E-13	1.82E-16
$\text{Al}_2(\text{OH})_2^{+4}$	7.93E-16	7.11E-17
$\text{Al}_3(\text{OH})_4^{+5}$	4.63E-19	1.16E-20
Al total	1.56E-02	
$\text{B}(\text{OH})_3$	2.16E+00	2.16E+00
BO_2^-	1.60E-01	1.37E-01
$\text{CaB}(\text{OH})_4^+$	1.32E-02	1.12E-02
$\text{MgB}(\text{OH})_4^+$	7.04E-03	6.01E-03
$\text{NaB}(\text{OH})_4$	4.32E-03	4.32E-03
$\text{BF}_2(\text{OH})_2^-$	2.42E-11	2.06E-11
$\text{B}_2\text{O}(\text{OH})_5^-$	1.52E-13	1.30E-13
BF_3OH^-	5.89E-17	5.03E-17
BF_4^-	1.35E-25	1.15E-25
B total	2.34E+00	
HCO_3^-	2.38E+00	2.03E+00
NaHCO_3	4.56E-02	4.56E-02
CO_2	3.78E-02	3.81E-02
CaHCO_3^+	2.85E-02	2.43E-02
CaCO_3	2.20E-02	2.20E-02
CO_3^{-2}	2.01E-02	1.07E-02
MgHCO_3^+	1.25E-02	1.06E-02
MgCO_3	4.78E-03	4.78E-03
CuCO_3	1.40E-03	1.40E-03
NaCO_3^-	7.24E-04	6.18E-04
MnCO_3	3.08E-04	3.08E-04
$\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{-2}$	5.74E-05	3.02E-05
MnHCO_3^+	1.31E-05	1.12E-05
$\text{CuCO}_3(\text{OH})_2^{-2}$	4.09E-07	2.16E-07
FeHCO_3^+	5.49E-09	4.68E-09
FeCO_3	3.03E-09	3.03E-09
FeCO_3^+	4.35E-11	3.71E-11
C(4) total	2.56E+00	
Ca^{+2}	1.84E+00	1.02E+00
CaSO_4	1.51E-01	1.51E-01
CaHCO_3^+	2.85E-02	2.43E-02
CaCO_3	2.20E-02	2.20E-02
$\text{CaB}(\text{OH})_4^+$	1.32E-02	1.12E-02
CaCl^+	3.54E-03	3.02E-03
CaNO_3^+	7.12E-04	6.08E-04
CaF^+	1.02E-04	8.72E-05
CaCl_2	5.40E-05	5.40E-05
CaOH^+	2.28E-05	1.94E-05
Ca total	2.06E+00	
Cl^-	1.68E+01	1.42E+01

NaCl	3.34E-02	3.34E-02
MgCl ⁺	6.00E-03	5.12E-03
CaCl ⁺	3.54E-03	3.02E-03
KCl	6.69E-04	6.69E-04
CaCl ₂	5.40E-05	5.40E-05
MnCl ⁺	2.20E-05	1.88E-05
CuCl ⁺	5.49E-07	4.68E-07
CuCl ₂ ⁻	8.35E-08	7.13E-08
HCl	2.35E-08	2.35E-08
CuCl ₃ ⁻²	1.24E-08	6.51E-09
CuCl ₂	3.51E-09	3.51E-09
MnCl ₃ ⁻	1.14E-09	9.69E-10
FeCl ⁺	5.20E-11	4.44E-11
FeCl ₂	3.28E-15	3.28E-15
CuCl ₄ ⁻²	2.53E-17	1.33E-17
FeCl ₂ ⁺	1.11E-17	9.45E-18
FeCl ₄ ⁻²	3.59E-18	1.89E-18
FeCl ⁺²	1.13E-18	6.01E-19
FeCl ₄ ⁻	2.70E-24	2.30E-24
Cl(-1) total	1.69E+01	
CuCl ₂ ⁻	8.35E-08	7.13E-08
CuCl ₃ ⁻²	1.24E-08	6.51E-09
Cu ⁺	6.22E-09	5.31E-09
Cu(1) total	1.02E-07	
CuCO ₃	1.40E-03	1.40E-03
CuOH ⁺	9.80E-05	8.36E-05
Cu(CO ₃) ₂ ⁻²	5.74E-05	3.02E-05
Cu ⁺²	2.17E-05	1.20E-05
CuSO ₄	2.95E-06	2.95E-06
CuCl ⁺	5.49E-07	4.68E-07
CuCO ₃ (OH) ₂ ⁻²	4.09E-07	2.16E-07
CuF ⁺	3.94E-09	3.36E-09
CuCl ²	3.51E-09	3.51E-09
CuO ₂ ⁻²	2.68E-12	1.41E-12
CuCl ₄ ⁻²	2.53E-17	1.33E-17
Cu(2) total	1.58E-03	
F	2.07E-02	1.76E-02
MgF ⁺	2.24E-04	1.91E-04
CaF ⁺	1.02E-04	8.72E-05
NaF	2.47E-05	2.47E-05
MnF ⁺	4.02E-07	3.43E-07
HF	1.78E-07	1.78E-07
AlF ₂ ⁺	2.01E-08	1.71E-08
AlF ⁺²	4.57E-09	2.44E-09

CuF^+	3.94E-09	3.36E-09
AlF_3	3.81E-09	3.81E-09
$\text{BF}_2(\text{OH})_2^-$	2.42E-11	2.06E-11
AlF_4^-	1.98E-11	1.69E-11
FeF^+	2.08E-12	1.77E-12
HF_2^-	8.39E-13	7.16E-13
FeF^{+2}	1.52E-16	8.09E-17
H_2F_2	1.00E-16	1.00E-16
BF_3OH^-	5.89E-17	5.03E-17
FeF_2^+	2.49E-17	2.12E-17
BF_4^-	1.35E-25	1.15E-25
SiF_6^{-2}	1.02E-34	5.35E-35
F total	2.11E-02	
Fe^{+2}	7.91E-09	4.39E-09
FeHCO_3^+	5.49E-09	4.68E-09
FeCO_3	3.03E-09	3.03E-09
FeSO_4	7.46E-10	7.46E-10
FeOH^+	2.19E-10	1.87E-10
FeCl^+	5.20E-11	4.44E-11
FeF^+	2.08E-12	1.77E-12
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	2.00E-13	2.00E-13
FeCl_2	3.28E-15	3.28E-15
$\text{Fe}(\text{OH})_3^-$	1.26E-15	1.08E-15
FeCl_4^{-2}	3.59E-18	1.89E-18
$\text{Fe}(\text{OH})_4^{-2}$	2.75E-22	1.45E-22
Fe(2) total	1.75E-08	
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	8.47E-04	8.47E-04
$\text{Fe}(\text{OH})_4^-$	3.36E-05	2.87E-05
$\text{Fe}(\text{OH})_2^+$	1.58E-05	1.34E-05
FeOH^{+2}	5.64E-10	3.01E-10
FeCO_3^+	4.35E-11	3.71E-11
Fe^{+3}	1.13E-15	3.46E-16
FeF^{+2}	1.52E-16	8.09E-17
FeSO_4^+	3.33E-17	2.84E-17
FeF_2^+	2.49E-17	2.12E-17
FeCl_2^+	1.11E-17	9.45E-18
FeCl^{+2}	1.13E-18	6.01E-19
FeNO_3^{+2}	7.70E-19	4.11E-19
$\text{Fe}(\text{SO}_4)^{2-}$	7.61E-19	6.50E-19
$\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{+4}$	2.72E-20	2.44E-21
FeCl_4^-	2.70E-24	2.30E-24
$\text{Fe}_3(\text{OH})_4^{+5}$	2.75E-25	6.86E-27
Fe(3) total	8.97E-04	
K^+	1.87E+00	1.59E+00

KSO_4^-	1.57E-02	1.34E-02
KCl	6.69E-04	6.69E-04
KOH	7.41E-07	7.41E-07
KHSO_4	6.96E-11	6.96E-11
K total	1.89E+00	
Mg^{+2}	7.89E-01	4.59E-01
MgSO_4	1.12E-01	1.12E-01
MgHCO_3^+	1.25E-02	1.06E-02
MgB(OH)_4^+	7.04E-03	6.01E-03
MgCl^+	6.00E-03	5.12E-03
MgCO_3	4.78E-03	4.78E-03
MgF^+	2.24E-04	1.91E-04
$\text{Mg}_4(\text{OH})_4^{+4}$	2.89E-17	2.60E-18
Mg total	9.31E-01	
Mn^{+2}	1.30E-03	7.23E-04
MnCO_3	3.08E-04	3.08E-04
MnSO_4	1.75E-04	1.75E-04
MnCl^+	2.20E-05	1.88E-05
MnHCO_3^+	1.31E-05	1.12E-05
MnOH^+	2.93E-06	2.50E-06
MnF^+	4.02E-07	3.43E-07
MnNO_3^+	1.60E-07	1.36E-07
$\text{Mn}_2(\text{OH})_3^+$	1.89E-09	1.61E-09
MnCl_3^-	1.14E-09	9.69E-10
Mn(OH)_2	8.29E-10	8.29E-10
$\text{Mn(NO}_3)_2$	4.07E-11	4.07E-11
$\text{Mn}_2\text{OH}^{+3}$	7.74E-12	1.94E-12
Mn(OH)_3^-	1.23E-13	1.05E-13
Mn(OH)_4^{-2}	2.27E-19	1.20E-19
Mn(2) total	1.82E-03	
NO_3^-	1.40E-01	1.19E-01
CaNO_3^+	7.12E-04	6.08E-04
MnNO_3^+	1.60E-07	1.36E-07
$\text{Mn(NO}_3)_2$	4.07E-11	4.07E-11
HNO_3	3.99E-11	3.99E-11
FeNO_3^{+2}	7.70E-19	4.11E-19
N(5) total	1.41E-01	
Na^+	1.64E+01	1.40E+01
NaSO_4^-	1.16E-01	9.90E-02
NaHCO_3	4.56E-02	4.56E-02
NaCl	3.34E-02	3.34E-02
NaHSiO_3	1.23E-02	1.23E-02
NaB(OH)_4	4.32E-03	4.32E-03
NaCO_3^-	7.24E-04	6.18E-04

NaAlO ₂	3.18E-05	3.18E-05
NaF	2.47E-05	2.47E-05
NaOH	1.99E-06	1.99E-06
Na total	1.66E+01	
SO ₄ ⁻²	2.04E+00	1.07E+00
CaSO ₄	1.51E-01	1.51E-01
NaSO ₄ ⁻	1.16E-01	9.90E-02
MgSO ₄	1.12E-01	1.12E-01
KSO ₄ ⁻	1.57E-02	1.34E-02
MnSO ₄	1.75E-04	1.75E-04
CuSO ₄	2.95E-06	2.95E-06
HSO ₄ ⁻	7.92E-07	6.76E-07
FeSO ₄	7.46E-10	7.46E-10
KHSO ₄	6.96E-11	6.96E-11
AlSO ₄ ⁺	1.78E-11	1.52E-11
Al(SO ₄) ₂ ⁻	1.48E-12	1.26E-12
FeSO ₄ ⁺	3.33E-17	2.84E-17
H ₂ SO ₄	5.61E-18	5.61E-18
Fe(SO ₄) ₂ ⁻	7.61E-19	6.50E-19
S(6) total	2.43E+00	
SiO ₂	1.33E+00	1.33E+00
HSiO ₃ ⁻	1.95E-02	1.66E-02
NaHSiO ₃	1.23E-02	1.23E-02
H ₆ (H ₂ SiO ₄) ₄ ⁻²	2.49E-06	1.31E-06
H ₂ SiO ₄ ⁻²	5.05E-07	2.66E-07
H ₄ (H ₂ SiO ₄) ₄ ⁻⁴	1.57E-11	1.20E-12
SiF ₆ ⁻²	1.02E-34	5.35E-35
Si total	1.37E+00	

Índice de saturación de minerales en río Colpitas.

Nombre		SI
Afwillite	Ca ₃ Si ₂ O ₄ (OH) ₆	-27,06
Akermanite	Ca ₂ MgSi ₂ O ₇	-12,57
Al	Al	-119,46
Al(g)	Al	-171,37
Al ₂ (SO ₄) ₃	Al ₂ (SO ₄) ₃	-56,86
Al ₂ (SO ₄) ₃ :6H ₂ O	Al ₂ (SO ₄) ₃ :6H ₂ O	-38,96
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	5,35
Albite_high	NaAlSi ₃ O ₈	3,99
Albite_low	NaAlSi ₃ O ₈	5,35
AlF ₃	AlF ₃	-10,98
Alum-K	KAl(SO ₄) ₂ :12H ₂ O	-17,59
Alunite	KAl ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂	-1,92

Amesite-14A	$\text{Mg}_4\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	9,86
Analcime	$\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{2,04}\text{O}_6\cdot\text{H}_2\text{O}$	3,94
Analcime-dehy	$\text{Na}_{96}\text{Al}_{96}\text{Si}_{2,04}\text{O}_6$	-2,57
Andalusite	Al_2SiO_5	1,45
Andradite	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	8,76
Anhydrite	CaSO_4	-1,68
Annite	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-8,33
Anorthite	$\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$	1
Antarcticite	$\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-10,78
Anthophyllite	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-0,77
Antigorite	$\text{Mg}_{48}\text{Si}_{34}\text{O}_{85}(\text{OH})_{62}$	34,6
Antlerite	$\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$	-2,94
Aphthitalite	$\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$	-12,31
Aragonite	CaCO_3	0,38
Arcanite	K_2SO_4	-6,64
Artinite	$\text{Mg}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-5,09
Atacamite	$\text{Cu}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6$	-1,34
Azurite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	-6,19
B	B	-91,12
B(g)	B	-184,47
B_2O_3	B_2O_3	-10,94
Bassanite	$\text{CaSO}_4\cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	-2,33
Beidellite-Ca	$\text{Ca}_{1,65}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	10,15
Beidellite-H	$\text{H}_{3,33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8,95
Beidellite-K	$\text{K}_{3,33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	10,05
Beidellite-Mg	$\text{Mg}_{1,65}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	10,12
Beidellite-Na	$\text{Na}^{33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	10
$\text{BF}_3(\text{g})$	BF_3	-38,65
Birnessite	$\text{Mn}_8\text{O}_{14}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-26,23
Bischofite	$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-11,43
Bixbyite	Mn_2O_3	-2,79
Bloedite	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-10,51
Boehmite	AlO_2H	2,57
Borax	$\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4)\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-9,86
Boric acid	$\text{B}(\text{OH})_3$	-2,43
Brochantite	$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	-1,89
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	-3,77
Burkeite	$\text{Na}_6\text{CO}_3(\text{SO}_4)_2$	-21,11
C	C	-45,16
C(g)	C	-165,4
Ca	Ca	-113,96
Ca(g)	Ca	-139,84
Ca-Al Pyroxene	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$	-5,77
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5\cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-11,97

Ca ₂ Cl ₂ (OH) ₂ ·H ₂ O	Ca ₂ Cl ₂ (OH) ₂ ·H ₂ O	-19,71
Ca ₃ Al ₂ O ₆	Ca ₃ Al ₂ O ₆	-55,21
Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	-58,66
Ca ₄ Al ₂ O ₇ ·13H ₂ O	Ca ₄ Al ₂ O ₇ ·13H ₂ O	-33,12
Ca ₄ Al ₂ O ₇ ·19H ₂ O	Ca ₄ Al ₂ O ₇ ·19H ₂ O	-29,55
Ca ₄ Cl ₂ (OH) ₆ ·13H ₂ O	Ca ₄ Cl ₂ (OH) ₆ ·13H ₂ O	-35,21
CaAl ₂ O ₄	CaAl ₂ O ₄	-14,18
CaAl ₂ O ₄ ·10H ₂ O	CaAl ₂ O ₄ ·10H ₂ O	-3,67
CaAl ₄ O ₇	CaAl ₄ O ₇	-15,83
Calcite	CaCO ₃	0,53
Carnallite	KMgCl ₃ ·6H ₂ O	-15,95
CaSO ₄ ·0.5H ₂ O (beta)	CaSO ₄ ·0.5H ₂ O	-2,5
Celadonite	KMgAlSi ₄ O ₁₀ (OH) ₂	9,71
Chalcanthite	CuSO ₄ ·5H ₂ O	-8,24
Chalcedony	SiO ₂	1
Chalcocyanite	CuSO ₄	-14,06
Chamosite-7A	Fe ₂ Al ₂ SiO ₅ (OH) ₄	-6,1
Chloromagnesite	MgCl ₂	-29,43
Chrysocolla	CuSiH ₄ O ₅	-0,75
Chrysotile	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	1,19
Cl ₂ (g)	Cl ₂	-38,76
Clinochlore-14A	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	7,75
Clinochlore-7A	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	4,33
Clinoptilolite-Ca	Ca _{1.7335} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆ ·10.922H ₂ O	24,95
Clinoptilolite-dehy-Ca	Ca _{1.7335} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆	-11,63
Clinoptilolite-dehy-K	K _{3.467} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆	-11,71
Clinoptilolite-dehy-Na	Na _{3.467} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆	-12,47
Clinoptilolite-hy-Ca	Ca _{1.7335} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆ ·11.645H ₂ O	24,98
Clinoptilolite-hy-K	K _{3.467} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆ ·7.499 H ₂ O	24,75
Clinoptilolite-hy-Na	Na _{3.467} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆ ·10.877 H ₂ O	24,12
Clinoptilolite-K	K _{3.467} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆ ·10.922 H ₂ O	24,88
Clinoptilolite-Na	Na _{3.467} Al _{3.45} Fe _{0.17} Si _{14.533} O ₃₆ ·10.922 H ₂ O	24,12
Clinozoisite	Ca ₂ Al ₃ Si ₃ O ₁₂ (OH)	4,74
CO ₂ (g)	CO ₂	-3,03
Coesite	SiO ₂	0,45
Colemanite	Ca ₂ B ₆ O ₁₁ ·5H ₂ O	-10,97
Cordierite_anhyd	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	-0,75
Cordierite_hydr	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈ ·H ₂ O	1,8
Corundum	Al ₂ O ₃	1,83
Cristobalite(alpha)	SiO ₂	0,71
Cristobalite(beta)	SiO ₂	0,25
Cronstedtite-7A	Fe ₂ Fe ₂ SiO ₅ (OH) ₄	1,71
Cu	Cu	-8,32
Cu(g)	Cu	-61,71

CuCl ₂	CuCl ₂	-15,51
CuF	CuF	-23,11
CuF ₂	CuF ₂	-16,81
CuF ₂ ·2H ₂ O	CuF ₂ ·2H ₂ O	-12,88
Cuprite	Cu ₂ O	-4,28
Daphnite-14A	Fe ₅ AlAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-17,04
Daphnite-7A	Fe ₅ AlAlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-20,47
Dawsonite	NaAlCO ₃ (OH) ₂	1,36
Delafossite	CuFeO ₂	9,15
Diaspore	AlHO ₂	2,98
Dicalcium_silicate	Ca ₂ SiO ₄	-14,26
Diopside	CaMgSi ₂ O ₆	-0,93
Diopase	CuSiO ₂ (OH) ₂	-0,68
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	1,85
Dolomite-dis	CaMg(CO ₃) ₂	0,27
Dolomite-ord	CaMg(CO ₃) ₂	1,86
Enstatite	MgSiO ₃	-1,54
Epidote	Ca ₂ FeAl ₂ Si ₃ O ₁₂ OH	10,72
Epidote-ord	FeCa ₂ Al ₂ (OH)(SiO ₄) ₃	10,73
Epsomite	MgSO ₄ ·7H ₂ O	-4,35
Ettringite	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ ·26H ₂ O	-20,91
F ₂ (g)	F ₂	-98,52
Fayalite	Fe ₂ SiO ₄	-12,68
Fe	Fe	-39,86
Fe(OH) ₂	Fe(OH) ₂	-9,34
Fe(OH) ₃	Fe(OH) ₃	-0,02
Fe ₂ (SO ₄) ₃	Fe ₂ (SO ₄) ₃	-49,8
FeF ₂	FeF ₂	-18,63
FeF ₃	FeF ₃	-13,51
FeO	FeO	-9,01
Ferrite-Ca	CaFe ₂ O ₄	2,66
Ferrite-Dicalcium	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	9,14
Ferrite-Mg	MgFe ₂ O ₄	-20,15
Ferrite-Zn	ZnFe ₂ O ₄	2,73
Ferrosilite	FeSiO ₃	-5,59
FeSO ₄	FeSO ₄	-17,2
Fluorite	CaF ₂	-2,39
Forsterite	Mg ₂ SiO ₄	-5,59
Foshagite	Ca ₄ Si ₃ O ₉ (OH) ₂ ·0.5H ₂ O	-22,66
Gaylussite	CaNa ₂ (CO ₃) ₂ ·5H ₂ O	-6,99
Gehlenite	Ca ₂ Al ₂ SiO ₇	-13,29
Gibbsite	Al(OH) ₃	2,41
Gismondine	Ca ₂ Al ₄ Si ₄ O ₁₆ ·9H ₂ O	15,44
Glauberite	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	-7,17

Goethite	FeOOH	5,17
Greenalite	Fe ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-14,22
Grossular	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	-1,1
Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-1,44
Gyrolite	Ca ₂ Si ₃ O ₇ (OH) ₂ ·1.5H ₂ O	-5,18
H ₂ (g)	H ₂	-28,4
H ₂ O (g)	H ₂ O	-1,75
Halite	NaCl	-5,25
Hatrurite	Ca ₃ SiO ₅	-38,01
Hausmannite	Mn ₃ O ₄	-4,06
HCl(g)	HCl	-16,55
Hedenbergite	CaFe(SiO ₃) ₂	-7,56
Hematite	Fe ₂ O ₃	11,31
Hercynite	FeAl ₂ O ₄	-4,11
Hexahydrite	MgSO ₄ ·6H ₂ O	-4,58
Hillebrandite	Ca ₂ SiO ₃ (OH) ₂ ·0.17H ₂ O	-13,85
Huntite	CaMg ₃ (CO ₃) ₄	-2,11
Hydroboracite	MgCaB ₆ O ₁₁ ·6H ₂ O	-10,17
Hydromagnesite	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·4H ₂ O	-10,53
Hydrophilite	CaCl ₂	-18,73
Ice	H ₂ O	-0,12
Illite	K _{0.6} Mg _{0.25} Al _{1.8} Al _{0.5} Si _{3.5} O ₁₀ (OH) ₂	11,09
Jadeite	NaAl(SiO ₃) ₂	2,45
Jarosite	KFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	-6,63
Jarosite-Na	NaFe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	-8,95
K	K	-59,27
K(g)	K	-70,2
K-Feldspar	KAlSi ₃ O ₈	7,54
K ₂ CO ₃ ·1.5H ₂ O	K ₂ CO ₃ ·1.5H ₂ O	-13,54
K ₂ O	K ₂ O	-74,94
K ₃ H(SO ₄) ₂	K ₃ H(SO ₄) ₂	-18,85
K ₈ H ₄ (CO ₃) ₆ ·3H ₂ O	K ₈ H ₄ (CO ₃) ₆ ·3H ₂ O	-50
Kainite	KMgClSO ₄ ·3H ₂ O	-10,64
KAl(SO ₄) ₂	KAl(SO ₄) ₂	-26,38
Kalinite	KHCO ₃	-5,78
Kalsilite	KAlSiO ₄	1,74
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	8,05
Katoite	Ca ₃ Al ₂ H ₁₂ O ₁₂	-18,08
Kieserite	MgSO ₄ ·H ₂ O	-6,04
KMgCl ₃	KMgCl ₃	-33,41
KMgCl ₃ ·2H ₂ O	KMgCl ₃ ·2H ₂ O	-25,92
KNaC ₃ ·6H ₂ O	KNaC ₃ ·6H ₂ O	-9,48
Kyanite	Al ₂ SiO ₅	1,74
Lansfordite	MgCO ₃ ·5H ₂ O	-2,74

Larnite	Ca_2SiO_4	-15,59
Laumontite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	8,66
Lawrencite	FeCl_2	-24,42
Lawsonite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	5,58
Leonite	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-10,77
Lime	CaO	-20,01
Magnesite	MgCO_3	-0,34
Magnetite	Fe_3O_4	5,55
Malachite	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	-0,32
Manganite	$\text{MnO}(\text{OH})$	-1,36
Manganosite	MnO	-8,24
Margarite	$\text{CaAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	6,81
Maximum_Microcline	KAlSi_3O_8	7,54
Mayenite	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	-202,33
Melanterite	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-11,89
Mercallite	KHSO_4	-12,46
Merwinite	$\text{MgCa}_3(\text{SiO}_4)_2$	-23
Mesolite	$\text{Na}_{,676}\text{Ca}_{,657}\text{Al}_{1,99}\text{Si}_{3,01}\text{O}_{10} \cdot 2.647\text{H}_2\text{O}$	11,12
Mg	Mg	-96,71
Mg(g)	Mg	-116,97
$\text{Mg}_{1,25}\text{SO}_4(\text{OH})_{0,5} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	$\text{Mg}_{1,25}\text{SO}_4(\text{OH})_{0,5} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	-8,63
$\text{Mg}_{1,5}\text{SO}_4(\text{OH})$	$\text{Mg}_{1,5}\text{SO}_4(\text{OH})$	-9,52
$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-20,1
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-14,5
$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-23,54
MgOHCl	MgOHCl	-13,38
MgSO_4	MgSO_4	-11,47
Minnesotaite	$\text{Fe}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-11
Mirabilite	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-5,24
Misenite	$\text{K}_8\text{H}_6(\text{SO}_4)_7$	-80,89
Mn	Mn	-59,03
$\text{Mn}(\text{OH})_2$ (am)	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	-5,55
$\text{Mn}(\text{OH})_3$	$\text{Mn}(\text{OH})_3$	-7,87
$\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-13,96
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-12,63
$\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-15,56
MnO_2 (gamma)	MnO_2	-5,88
MnSO_4	MnSO_4	-11,96
Molysite	FeCl_3	-38,03
Monohydrocalcite	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-0,31
Monticellite	CaMgSiO_4	-6,93
Montmor-Ca	$\text{Ca}_{,165}\text{Mg}_{,33}\text{Al}_{1,67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,84
Montmor-K	$\text{K}_{,33}\text{Mg}_{,33}\text{Al}_{1,67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,81
Montmor-Mg	$\text{Mg}_{,495}\text{Al}_{1,67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,89

Montmor-Na	$\text{Na}_{.33}\text{Mg}_{.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,77
Mordenite	$\text{Ca}_{.2895}\text{Na}_{.361}\text{Al}_{.94}\text{Si}_{5.06}\text{O}_{12} \cdot 3.468\text{H}_2\text{O}$	6,9
Mordenite-dehy	$\text{Ca}_{.2895}\text{Na}_{.361}\text{Al}_{.94}\text{Si}_{5.06}\text{O}_{12}$	-8,6
Muscovite	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	13,97
Na	Na	-54,68
Na(g)	Na	-68,56
Na_2CO_3	Na_2CO_3	-9,58
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-8,12
Na_2O	Na_2O	-56,15
Na_2SiO_3	Na_2SiO_3	-12,83
$\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$	$\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$	-18,74
$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-13,43
Na_4SiO_4	Na_4SiO_4	-49,57
$\text{Na}_6\text{Si}_2\text{O}_7$	$\text{Na}_6\text{Si}_2\text{O}_7$	-71,35
NaFeO_2	NaFeO_2	-8,28
Nahcolite	NaHCO_3	-4,35
Nantokite	CuCl	-6,2
Natrolite	$\text{Na}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5,92
Natron	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-7,68
Natrosilite	$\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$	-11,45
Nepheline	NaAlSiO_4	-0,31
Nesquehonite	$\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-3,37
Niter	KNO_3	-6,37
NO_2 (g)	NO_2	-12,91
Nontronite-Ca	$\text{Ca}_{.165}\text{Fe}_2\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{H}_2\text{O}_{12}$	18,58
Nontronite-H	$\text{H}_{.33}\text{Fe}_2\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{H}_2\text{O}_{12}$	17,38
Nontronite-K	$\text{K}_{.33}\text{Fe}_2\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{H}_2\text{O}_{12}$	18,47
Nontronite-Mg	$\text{Mg}_{.165}\text{Fe}_2\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{H}_2\text{O}_{12}$	18,55
Nontronite-Na	$\text{Na}_{.33}\text{Fe}_2\text{Al}_{.33}\text{Si}_{3.67}\text{H}_2\text{O}_{12}$	18,43
O_2 (g)	O_2	-28,39
Okenite	$\text{CaSi}_2\text{O}_4(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-2,86
Oxychloride-Mg	$\text{Mg}_2\text{Cl}(\text{OH})_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-9,97
Paragonite	$\text{NaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	10,87
Pargasite	$\text{NaCa}_2\text{Al}_3\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	-6,06
Pentahydrate	$\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-4,92
Periclase	MgO	-8,95
Phlogopite	$\text{KAlMg}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	7,58
Picromerite	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-10,44
Pirssonite	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-7,15
Polyhalite	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-12,49
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	-9,75
Prehnite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	5,05
Pseudowollastonite	CaSiO_3	-3,85
Pyrolusite	MnO_2	-4,04

Pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8,92
Quartz	SiO_2	1,28
Rankinite	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$	-18,87
Rhodochrosite	MnCO_3	-0,56
Rhodonite	MnSiO_3	-2,68
Ripidolite-14A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-1,87
Ripidolite-7A	$\text{Mg}_3\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-5,3
Sanidine_high	KAlSi_3O_8	6,3
Saponite-Ca	$\text{Ca}_{1,65}\text{Mg}_3\text{Al}_{3,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	6,99
Saponite-H	$\text{H}_{3,33}\text{Mg}_3\text{Al}_{3,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	5,78
Saponite-K	$\text{K}_{3,33}\text{Mg}_3\text{Al}_{3,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	6,88
Saponite-Mg	$\text{Mg}_{3,165}\text{Al}_{3,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	6,96
Saponite-Na	$\text{Na}_{3,33}\text{Mg}_3\text{Al}_{3,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	6,84
Scacchite	MnCl_2	-18,85
Scolecite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{10} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	9,22
Sellaite	MgF_2	-3,45
Sepiolite	$\text{Mg}_4\text{Si}_6\text{O}_{15}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3,66
Si	Si	-123,66
Si(g)	Si	-196,38
Siderite	FeCO_3	-5,82
SiF ₄ (g)	SiF_4	-39,27
Sillimanite	Al_2SiO_5	1,07
SiO ₂ (am)	SiO_2	-0,05
Smectite-high-Fe-Mg	$\text{Ca}_{0,25}\text{Na}_{1,1}\text{K}_{2,5}\text{Fe}_{2,5}\text{Mg}_{1,15}\text{Al}_{1,25}\text{Si}_{3,5}\text{H}_2\text{O}_{12}$	5,63
Smectite-low-Fe-Mg	$\text{Ca}_{0,2}\text{Na}_{1,5}\text{K}_{2,9}\text{Fe}_{2,9}\text{Fe}_{1,6}\text{Mg}_{0,9}\text{Al}_{1,25}\text{Si}_{3,75}\text{H}_2\text{O}_{12}$	7,25
Spinel	Al_2MgO_4	-5,08
Starkeyite	$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-5,31
Stilbite	$\text{Ca}_{1,019}\text{Na}_{1,136}\text{K}_{0,006}\text{Al}_{2,18}\text{Si}_{6,82}\text{O}_{18} \cdot 7,33\text{H}_2\text{O}$	16,67
Sylvite	KCl	-5,41
Syngenite	$\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-6,93
Tachyhydrite	$\text{Mg}_2\text{CaCl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	-37,9
Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	5,75
Tenorite	CuO	0,46
Tephroite	Mn_2SiO_4	-6,25
Thenardite	Na_2SO_4	-6,33
Thermonatrite	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-9,31
Tobermorite-11A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{11}\text{O}_{22,5}$	-17,33
Tobermorite-14A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_{21}\text{O}_{27,5}$	-15,35
Tobermorite-9A	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{H}_6\text{O}_{20}$	-20,95
Todorokite	$\text{Mn}_7\text{O}_{12} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-17,46
Tremolite	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	5,76
Tridymite	SiO_2	1,09
Trona-K	$\text{K}_2\text{NaH}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-16,3
Wairakite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4$	4,06

Wollastonite	CaSiO_3	-3,61
Wustite	$\text{Fe}_{.947}\text{O}$	-8,03
Xonotlite	$\text{Ca}_6\text{Si}_6\text{O}_{17}(\text{OH})_2$	-31,15
Zoisite	$\text{Ca}_2\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{OH}$	4,7

Índice de saturación de minerales al evaporar aguas del Colpitas.

Nombre		SI
Afwillite	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_4(\text{OH})_6$	-24,78
Akermanite	$\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$	-10,19
Al	Al	-137,39
Al(g)	Al	-189,3
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	-48,33
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-30,62
Alabandite	MnS	-133,11
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	11,99
Albite_high	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	10,63
Albite_low	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	11,99
AlF_3	AlF_3	-3,38
Alum-K	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	-11,39
Alunite	$\text{KAl}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$	4,45
Amesite-14A	$\text{Mg}_4\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	11,36
Analcime	$\text{Na}_{.96}\text{Al}_{.96}\text{Si}_{2.04}\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$	8,65
Analcime-dehy	$\text{Na}_{.96}\text{Al}_{.96}\text{Si}_{2.04}\text{O}_6$	2,17
Andalusite	Al_2SiO_5	3,26
Andradite	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	17,11
Anhydrite	CaSO_4	0,7
Annite	$\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-13,54
Anorthite	$\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2$	4,26
Antarcticite	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-5,91
Anthophyllite	$\text{Mg}_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	11,27
Antigorite	$\text{Mg}_{48}\text{Si}_{34}\text{O}_{85}(\text{OH})_{62}$	75,76
Antlerite	$\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$	-2,19
Aphthitalite	$\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$	-2,98
Aragonite	CaCO_3	2,4
Arcanite	K_2SO_4	-1,97
Artinite	$\text{Mg}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-3,7
Atacamite	$\text{Cu}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6$	1,37
Azurite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	-3,26
B	B	-106,9
B(g)	B	-200,25
B_2O_3	B_2O_3	-6,77
Bassanite	$\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	0,04
Beidellite-Ca	$\text{Ca}_{.165}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,02

Beidellite-H	$\text{H}_{33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	15,89
Beidellite-K	$\text{K}_{33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,29
Beidellite-Mg	$\text{Mg}_{165}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	16,99
Beidellite-Na	$\text{Na}^{33}\text{Al}_{2,33}\text{Si}_{3,67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,24
BF_3 (g)	BF_3	-28,89
Birnessite	$\text{Mn}_8\text{O}_{14} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	40,3
Bischofite	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-6,55
Bixbyite	Mn_2O_3	7,93
Bloedite	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-3,62
Boehmite	AlO_2H	2,48
Borax	$\text{Na}_2(\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4) \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-0,1
Boric_acid	$\text{B}(\text{OH})_3$	-0,4
Bornite	Cu_5FeS_4	-497,96
Brochantite	$\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$	-1,87
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	-4,3
Burkeite	$\text{Na}_6\text{CO}_3(\text{SO}_4)_2$	-7,57
C	C	-66,47
C(g)	C	-186,7
Ca	Ca	-126,37
Ca(g)	Ca	-152,26
Ca-Al_Pyroxene	$\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$	-4,46
$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	-13,38
$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_2\text{Cl}_2(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-15,2
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	-56,85
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	-56,78
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-35,7
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7 \cdot 19\text{H}_2\text{O}$	-32,34
$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_4\text{Cl}_2(\text{OH})_6 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	-32,19
CaAl_2O_4	CaAl_2O_4	-14,81
$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-4,64
CaAl_4O_7	CaAl_4O_7	-16,59
Calcite	CaCO_3	2,54
Carnallite	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-7,4
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ (beta)	$\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	-0,14
Celadonite	$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,78
CH_4 (g)	CH_4	-138
Chalcanthite	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-6,21
Chalcedony	SiO_2	2,95
Chalcocite	Cu_2S	-127,05
Chalcocyanite	CuSO_4	-11,86
Chalcopyrite	CuFeS_2	-244,26
Chamosite-7A	$\text{Fe}_2\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$	-12,24
Chloromagnesite	MgCl_2	-24,35
Chrysocolla	CuSiH_4O_5	0,44

Chrysotile	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	3,52
Cl_2 (g)	Cl_2	-21,27
Clinochlore-14A	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	10,83
Clinochlore-7A	$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	7,41
Clinoptilolite-Ca	$\text{Ca}_{1,7335}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,922\text{H}_2\text{O}$	51,77
Clinoptilolite-dehy-Ca	$\text{Ca}_{1,7335}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36}$	15,56
Clinoptilolite-dehy-K	$\text{K}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36}$	19,44
Clinoptilolite-dehy-Na	$\text{Na}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36}$	18,63
Clinoptilolite-dehy-NH4-171.46	$(\text{NH}_4)_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36}$	-178,31
Clinoptilolite-hy-Ca	$\text{Ca}_{1,7335}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 11,645\text{H}_2\text{O}$	51,78
Clinoptilolite-hy-K	$\text{K}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 7,499\text{H}_2\text{O}$	55,65
Clinoptilolite-hy-Na	$\text{Na}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,877\text{H}_2\text{O}$	54,84
Clinoptilolite-K	$\text{K}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,922\text{H}_2\text{O}$	55,66
Clinoptilolite-Na	$\text{Na}_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,922\text{H}_2\text{O}$	54,84
Clinoptilolite-NH4-136.20	$(\text{NH}_4)_{3,467}\text{Al}_{3,45}\text{Fe}_{,017}\text{Si}_{14,533}\text{O}_{36} \cdot 10,922\text{H}_2\text{O}$	-178,68
Clinozoisite	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$	9,35
CO (g)	CO	-44,32
CO ₂ (g)	CO ₂	-0,51
Coesite	SiO ₂	2,4
Colemanite	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0,37
Cordierite_anhyd	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	7,71
Cordierite_hydr	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \cdot \text{H}_2\text{O}$	10,22
Corundum	Al ₂ O ₃	1,7
Covellite	CuS	-112,09
Cristobalite(alpha)	SiO ₂	2,66
Cristobalite(beta)	SiO ₂	2,2
Cronstedtite-7A	$\text{Fe}_2\text{Fe}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$	-0,27
Cu	Cu	-20,92
Cu(g)	Cu	-74,32
CuCl ₂	CuCl ₂	-10,62
CuF	CuF	-27,2
CuF ₂	CuF ₂	-12,39
CuF ₂ ·2H ₂ O	$\text{CuF}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-8,53
Cu ₂ O	Cu ₂ O	-17,57
Daphnite-14A	$\text{Fe}_5\text{AlAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-31,19
Daphnite-7A	$\text{Fe}_5\text{AlAlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	-34,63
Dawsonite	$\text{NaAlCO}_3(\text{OH})_2$	4,66
Delafossite	CuFeO ₂	4,52
Diaspore	AlHO ₂	2,9
Dicalcium_silicate	Ca ₂ SiO ₄	-13,32
Diopside	CaMgSi ₂ O ₆	1,96
Diopside	$\text{CuSiO}_2(\text{OH})_2$	0,54
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	5,89

Dolomite-dis	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	4,3
Dolomite-ord	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	5,9
Enstatite	MgSiO_3	-0,09
Epidote	$\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{OH}$	17,42
Epidote-ord	$\text{FeCa}_2\text{Al}_2(\text{OH})(\text{SiO}_4)_3$	17,42
Epsomite	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-2,19
Ettringite	$\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$	-16,47
F_2 (g)	F_2	-81,5
Fayalite	Fe_2SiO_4	-18,63
Fe	Fe	-55,71
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	-13,32
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	1,94
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	-37,11
FeF_2	FeF_2	-17,46
FeF_3	FeF_3	-3,83
FeO	FeO	-12,95
Ferrite-Ca	CaFe_2O_4	6,18
Ferrite-Cu	$\text{Cu Fe}_2\text{O}_4$	12,47
Ferrite-Dicalcium	$\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$	-17,13
Ferrite-Mg	MgFe_2O_4	6,26
Ferrosilite	FeSiO_3	-7,59
FeSO_4	FeSO_4	-18,26
Fluorite	CaF_2	2,22
Forsterite	Mg_2SiO_4	-4,64
Foshagite	$\text{Ca}_4\text{Si}_3\text{O}_9(\text{OH})_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	-18,89
Gaylussite	$\text{CaNa}_2(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-0,88
Gehlenite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	-12,48
Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	2,3
Gismondine	$\text{Ca}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	21,65
Glauberite	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	-0,15
Goethite	FeOOH	7,17
Greenalite	$\text{Fe}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	-22,23
Grossular	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	3,09
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,88
Gyrolite	$\text{Ca}_2\text{Si}_3\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$	-0,44
H_2 (g)	H_2	-40,35
H_2O (g)	H_2O	-1,78
H_2S (g)	H_2S	-134,99
Halite	NaCl	-1,59
Hatrurite	Ca_3SiO_5	-37,57
Hausmannite	Mn_3O_4	6,06
$\text{HCl}(\text{g})$	HCl	-13,78
Hedenbergite	$\text{CaFe}(\text{SiO}_3)_2$	-8,11
Hematite	Fe_2O_3	15,33

Hercynite	FeAl_2O_4	-8,18
Hexahydrite	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-2,4
Hillebrandite	$\text{Ca}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2 \cdot 0.17\text{H}_2\text{O}$	-12,95
Huntite	$\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$	5,97
Hydroboracite	$\text{MgCaB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1,15
Hydromagnesite	$\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-3,12
Hydrophilite	CaCl_2	-13,66
Ice	H_2O	-0,15
Illite	$\text{K}_{0,6}\text{Mg}_{0,25}\text{Al}_{1,8}\text{Al}_{0,5}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	18,12
Jadeite	$\text{NaAl}(\text{SiO}_3)_2$	7,14
Jarosite	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	5,98
Jarosite-Na	$\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	3,63
K	K	-64,34
K(g)	K	-75,26
K-Feldspar	KAlSi_3O_8	14,2
$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1.5\text{H}_2\text{O}$	-9,29
K_2O	K_2O	-73,16
$\text{K}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$	$\text{K}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$	-10,42
$\text{K}_8\text{H}_4(\text{CO}_3)_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\text{K}_8\text{H}_4(\text{CO}_3)_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-27,94
Kainite	$\text{KMgClSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-4,68
$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$	$\text{KAl}(\text{SO}_4)_2$	-19,78
Kalinite	KHCO_3	-2,38
Kalsilite	KAlSiO_4	4,51
Kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	11,74
Katoite	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{H}_{12}\text{O}_{12}$	-19,92
Kieserite	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-3,69
KMgCl_3	KMgCl_3	-24,65
$\text{KMgCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{KMgCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-17,23
$\text{KNaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\text{KNaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	-5,4
Kyanite	Al_2SiO_5	3,55
Lansfordite	$\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-0,89
Larnite	Ca_2SiO_4	-14,65
Laumontite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	15,67
Lawrencite	FeCl_2	-22,78
Lawsonite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	8,77
Leonite	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-3,84
Lime	CaO	-20,51
Magnesite	MgCO_3	1,68
Magnetite	Fe_3O_4	5,63
Malachite	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	0,78
Manganite	$\text{MnO}(\text{OH})$	3,98
Manganosite	MnO	-8,84
Margarite	$\text{CaAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	9,9
Maximum_Microcline	KAlSi_3O_8	14,2

Mayenite	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	-209,29
Melanterite	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-13,18
Mercallite	KHSO_4	-8,7
Merwinite	$\text{MgCa}_3(\text{SiO}_4)_2$	-21,12
Mesolite	$\text{Na}_{.676}\text{Ca}_{.657}\text{Al}_{1.99}\text{Si}_{3.01}\text{O}_{10} \cdot 2.647\text{H}_2\text{O}$	17,02
Mg	Mg	-109,12
Mg (g)	Mg	-129,38
$\text{Mg}_{1.25}\text{SO}_4(\text{OH})_{0.5} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	$\text{Mg}_{1.25}\text{SO}_4(\text{OH})_{0.5} \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	-6,39
$\text{Mg}_{1.5}\text{SO}_4(\text{OH})$	$\text{Mg}_{1.5}\text{SO}_4(\text{OH})$	-7,4
$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-15,09
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-9,56
$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-18,5
MgOHCl	MgOHCl	-11,11
MgSO_4	MgSO_4	-9,08
Minnesotaite	$\text{Fe}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-15,08
Mirabilite	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-0,94
Misenite	$\text{K}_8\text{H}_6(\text{SO}_4)_7$	-53,66
Mn	Mn	-71,53
$\text{Mn}(\text{OH})_2$ (am)	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	-6,18
$\text{Mn}(\text{OH})_3$	$\text{Mn}(\text{OH})_3$	-2,56
$\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-9,04
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	-7,78
$\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\text{MnCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	-10,61
MnO_2 (gamma)	MnO_2	5,44
MnSO_4	MnSO_4	-9,67
Molysite	FeCl_3	-27,65
Monticellite	CaMgSiO_4	1,68
Montmor-Ca	$\text{Ca}_{.165}\text{Mg}_{.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	-5,99
Montmor-Ca	$\text{Ca}_{.165}\text{Mg}_{.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,23
Montmor-K	$\text{K}_{.33}\text{Mg}_{.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,58
Montmor-Mg	$\text{Mg}_{.495}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,28
Montmor-Na	$\text{Na}_{.33}\text{Mg}_{.33}\text{Al}_{1.67}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	17,52
Mordenite	$\text{Ca}_{.2895}\text{Na}_{.361}\text{Al}_{.94}\text{Si}_{5.06}\text{O}_{12} \cdot 3.468\text{H}_2\text{O}$	16,73
Mordenite-dehy	$\text{Ca}_{.2895}\text{Na}_{.361}\text{Al}_{.94}\text{Si}_{5.06}\text{O}_{12}$	1,35
Muscovite	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	20,46
N_2 (g)	N_2	-4,84
Na	Na	-59,76
Na(g)	Na	-73,64
Na_2CO_3	Na_2CO_3	-5,31
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-4,09
Na_2O	Na_2O	-54,41
Na_2SiO_3	Na_2SiO_3	-9,13
$\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$	$\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$	-10,36
$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-1,83

Na ₄ SiO ₄	Na ₄ SiO ₄	-44,13
Na ₆ Si ₂ O ₇	Na ₆ Si ₂ O ₇	-62,21
NaFeO ₂	NaFeO ₂	-5,39
Nahcolite	NaHCO ₃	-0,97
Nantokite	CuCl	-10,06
Natrolite	Na ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ ·2H ₂ O	13,3
Natron	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	-3,75
Natrosilite	Na ₂ Si ₂ O ₅	-5,81
Nepheline	NaAlSiO ₄	2,44
Nesquehonite	MgCO ₃ ·3H ₂ O	-1,45
NH ₃ (g)	NH ₃	-59,89
Niter	KNO ₃	-2,69
NO(g)	NO	-20,19
NO ₂ (g)	NO ₂	-16,07
Nontronite-Ca	Ca _{1,65} Fe ₂ Al _{3,33} Si _{3,67} H ₂ O ₁₂	29,6
Nontronite-H	H _{3,33} Fe ₂ Al _{3,33} Si _{3,67} H ₂ O ₁₂	28,47
Nontronite-K	K _{3,33} Fe ₂ Al _{3,33} Si _{3,67} H ₂ O ₁₂	29,87
Nontronite-Mg	Mg _{1,65} Fe ₂ Al _{3,33} Si _{3,67} H ₂ O ₁₂	29,57
Nontronite-Na	Na _{3,33} Fe ₂ Al _{3,33} Si _{3,67} H ₂ O ₁₂	29,82
O ₂ (g)	O ₂	-4,57
Okenite	CaSi ₂ O ₄ (OH) ₂ ·H ₂ O	0,46
Oxychloride-Mg	Mg ₂ Cl(OH) ₃ ·4H ₂ O	-8,36
Paragonite	NaAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	17,34
Pargasite	NaCa ₂ Al ₃ Mg ₄ Si ₆ O ₂₂ (OH) ₂	3,25
Pentahydrate	MgSO ₄ ·5H ₂ O	-2,7
Periclase	MgO	-9,45
Phlogopite	KAlMg ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	12,7
Picromerite	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ ·6H ₂ O	-3,58
Pirssonite	Na ₂ Ca(CO ₃) ₂ ·2H ₂ O	-0,93
Polyhalite	K ₂ MgCa ₂ (SO ₄) ₄ ·2H ₂ O	-0,73
Portlandite	Ca(OH) ₂	-10,29
Prehnite	Ca ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	9,71
Pseudowollastonite	CaSiO ₃	-2,41
Pyrite	FeS ₂	-228,22
Pyrolusite	MnO ₂	7,28
Pyrophyllite	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	16,53
Pyrrhotite	FeS	-138,3
Quartz	SiO ₂	3,22
Rankinite	Ca ₃ Si ₂ O ₇	-16,49
Rhodochrosite	MnCO ₃	1,36
Rhodonite	MnSiO ₃	-1,33
Ripidolite-14A	Mg ₃ Fe ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-5,68
Ripidolite-7A	Mg ₃ Fe ₂ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	-9,11
S	S	-100,6

S ₂ (g)	S ₂	-215,56
Sanidine_high	KAlSi ₃ O ₈	12,96
Saponite-Ca	Ca _{1.65} Mg ₃ Al _{3.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	12,49
Saponite-H	H ₃₃ Mg ₃ Al _{1.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	11,36
Saponite-K	K ₃₃ Mg ₃ Al _{3.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	12,76
Saponite-Mg	Mg _{3.165} Al _{3.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	12,47
Saponite-Na	Na ₃₃ Mg ₃ Al _{3.33} Si _{3.67} O ₁₀ (OH) ₂	12,71
Scacchite	MnCl ₂	-13,87
Scolecite	CaAl ₂ Si ₃ O ₁₀ ·3H ₂ O	14,32
Sellaite	MgF ₂	1,16
Sepiolite	Mg ₄ Si ₆ O ₁₅ (OH) ₂ ·6H ₂ O	13,1
Si	Si	-145,54
Si (g)	Si	-218,26
Siderite	FeCO ₃	-7,25
SiF ₄ (g)	SiF ₄	-27,11
Sillimanite	Al ₂ SiO ₅	2,89
SiO ₂ (am)	SiO ₂	1,89
Smectite-high-Fe-Mg	Ca _{0.025} Na ₁ K ₂ Fe ₅ Fe ₂ Mg _{1.15} Al _{1.25} Si _{3.5} H ₂ O ₁₂	10,43
Smectite-low-Fe-Mg	Ca _{0.02} Na _{1.5} K ₂ Fe _{2.9} Fe _{1.6} Mg ₉ Al _{1.25} Si _{3.75} H ₂ O ₁₂	13,45
SO ₂ (g)	SO ₂	-51,49
Spinel	Al ₂ MgO ₄	-5,71
Starkeyite	MgSO ₄ ·4H ₂ O	-3,05
Stilbite	Ca _{1.019} Na _{1.36} K _{0.006} Al _{2.18} Si _{6.82} O ₁₈ ·7.33H ₂ O	29,15
Sylvite	KCl	-1,73
Syngenite	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ ·H ₂ O	0,09
Tachyhydrite	Mg ₂ CaCl ₆ ·12H ₂ O	-23,07
Talc	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	12
Tenorite	CuO	-0,24
Tephroite	Mn ₂ SiO ₄	-5,49
Thenardite	Na ₂ SO ₄	-1,7
Thermonatrite	Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O	-5,08
Tobermorite-11A	Ca ₅ Si ₆ H ₁₁ O _{22.5}	-8,36
Tobermorite-14A	Ca ₅ Si ₆ H ₂₁ O _{27.5}	-6,56
Tobermorite-9A	Ca ₅ Si ₆ H ₆ O ₂₀	-11,9
Todorokite	Mn ₇ O ₁₂ ·3H ₂ O	37,82
Tremolite	Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	17,78
Tridymite	SiO ₂	3,03
Troilite	FeS	-138,19
Trona-K	K ₂ NaH(CO ₃) ₂ ·2H ₂ O	-8,69
Wairakite	CaAl ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₄	11,13
Wollastonite	CaSiO ₃	-2,17
Wustite	Fe ₉₄₇ O	-11,13
Xonotlite	Ca ₆ Si ₆ O ₁₇ (OH) ₂	-22,54
Zoisite	Ca ₂ Al ₃ (SiO ₄) ₃ OH	9,31

12.3 Mediciones de terreno y de laboratorio

GPS	Temp °C	pH	Cond mS/cm	OD mg/L	Turbidez NTU	Potencial redox mV	Caudal L/s	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	B mg/L	As disuelto mg/L	As total mg/L	Fe disuelto mg/L	Fe total mg/L
9	20,2	8,3	4,61	-	21,7	103	532	-	34,2	0,46	0,49	0,11	0,28
10	16,8	4,8	2,28	-	124,0	236	2035	-	25,1	0,08	0,25	0,05	0,99
11	17,9	4,3	1,86	-	119,0	338	1334	-	6,9	0,04	0,16	0,06	2,05
16	-	3,3	3,18	-	56,0	458	595	-	7,2	-	0,24	-	10,7
20	-	6,8	0,23	-	10,0	190	-	202,0	0,0	-	0,02	-	-
22	-	6,5	0,21	-	8,0	205	-	378,1	0,3	-	-	-	-
24	-	6,5	0,59	-	20,0	230	-	155,0	0,1	-	0,01	-	0,83
27	19,6	7,5	6,18	-	10,2	220	-	400,3	114,5	-	1,27	-	0,96
29	-	6,5	0,30	-	5,0	201	-	132,6	0,3	-	0,02	-	0,37
57	-	9,6	0,13	7,5	-	-	-	-	0,2	0,03	0,04	<0,03	<0,03
58	-	8,1	3,71	7,6	-	-	-	939,2	11,4	-	-	-	-
62	-	-	-	-	-	-	79	-	13,5	-	-	-	-
63	23,5	1,8	8,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	23,5	1,7	7,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	23,6	1,7	7,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	23,4	1,7	8,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	22,9	1,7	8,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	20,5	1,5	18,70	-	-	-	87	-	42,4	-	-	-	-
69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	17,8	8,4	2,22	5,8	-	-	224	-	1,9	0,08	0,11	0,05	0,06
74	13,5	1,6	11,93	-	-	-	13	-	20,0	1,31	1,71	7,95	7,95
75	14,0	4,0	2,92	-	-	-	324	-	17,9	0,12	0,29	19,2	19,2
76	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
99	-	-	-	-	-	-	-	-	13,8	-	-	-	-
102	-	-	-	-	-	-	-	-	14,0	-	-	-	-
106	-	-	-	-	7,0	271	-	-	-	-	-	-	-
107	-	-	-	-	20,0	250	87	233,3	18,2	-	1,32	-	0,24
121	18,0	3,9	0,96	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-
123	16,8	2,9	1,26	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-

GPS	Temp °C	pH	Cond mS/cm	OD mg/L	Turbidez NTU	Potencial redox mV	Caudal L/s	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	B mg/L	As disuelto mg/L	As total mg/L	Fe disuelto mg/L	Fe total mg/L
131	15,4	3,8	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
134	22,1	7,7	2,30	-	-	-	1145	-	18,4	0,12	0,23	0,03	3,35
135	20,8	7,8	2,32	-	-	-	-	85,5	16,5	-	-	-	-
140	19,9	7,9	-	-	15,0	22,3	-	559,8	16,5	-	-	-	-
141	-	-	-	-	-	-	-	-	9,3	0,05	0,05	0,49	0,49
142	22,2	8,1	2,56	6,2	20,0	236	1200	502,3	16,7	-	-	-	-
143	21,0	8,2	2,24	6,0	53,4	268	-	-	13,5	-	-	-	-
144	-	-	-	-	-	-	-	-	16,0	-	-	-	-
145	21,0	8,1	2,20	5,9	80,0	253	-	-	15,0	-	-	-	-
146	20,4	8,2	1,60	6,1	54,0	276	-	-	-	-	-	-	-
149	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	21,6	8,2	2,03	5,4	47,5	266	-	85,5	15,9	-	-	-	-
151	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
152	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
153	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
154	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
155	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
156	21,1	8,1	2,15	5,4	52,6	249	-	69,7	17,0	-	-	-	-
159	20,1	8,2	2,15	5,8	50,2	269	-	166,2	15,5	-	0,37	-	1,37
160	19,2	8,2	2,16	6,2	90,0	270	-	11,3	16,0	-	0,40	-	1,61
161	-	8,1	2,30	-	-	-	-	81,0	17,9	-	-	-	-
162	19,3	8,0	2,24	6,2	280,0	249	-	199,8	14,5	-	0,26	-	0,99
163	20,7	8,1	2,57	6,6	8,1	254	-	98,9	18,5	-	-	-	-
165	-	8,0	0,34	-	-	-	-	83,2	0,1	-	0,01	-	0,15
169	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
171	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
172	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
173	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
174	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
184	20,1	7,6	2,00	4,4	26,0	243	1200	29,3	14,5	-	-	-	-

GPS	Temp °C	pH	Cond mS/cm	OD mg/L	Turbidez NTU	Potencial redox mV	Caudal L/s	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	B mg/L	As disuelto mg/L	As total mg/L	Fe disuelto mg/L	Fe total mg/L
185	18,6	8,1	1,10	4,6	6,9	71	4	96,7	1,7	-	0,03	-	1,1
186	19,0	7,4	2,80	-	25,0	243	1200	-	14,5	-	-	-	-
190	15,3	4,6	1,49	4,9	13,5	358	-	-	2,5	-	-	-	-
191	18,0	8,2	2,94	4,8	3,7	242	-	5,6	31,5	-	-	-	-
192	15,5	7,0	2,01	5,1	22,5	177	-	148,3	16,2	-	-	-	-
207	15,0	8,1	0,29	6,6	2,0	215	4	24,8	0,6	-	0,02	-	0,29
208	21,6	8,9	2,55	4,2	1,0	223	1	415,9	22,9	-	-	-	-
209	19,6	7,9	6,62	4,8	17,8	223	-	369,2	101,8	-	1,68	-	2,4
212	-	7,9	0,69	-	15,0	-	0	33,8	0,7	-	0,01	-	-
213	24,2	7,3	14,13	-	-	-	2	-	250,5	-	-	-	-
216	42,1	6,0	22,20	-	3,0	60	-	902,1	351,0	-	6,20	-	0,21
217	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
218	20,0	7,0	17,62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
219	26,5	7,2	23,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
220	20,5	8,1	5,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
221	23,0	8,3	16,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
222	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
223	17,0	7,0	26,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
224	25,0	7,9	11,80	9,8	30,0	273	-	533,3	227,6	-	4,32	-	0,89
227	19,0	8,2	0,58	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
236	15,3	8,4	0,53	-	9,7	271	-	-	-	-	-	-	-
237	15,0	8,5	0,50	4,4	7,4	261	-	139,3	0,1	-	-	-	0,56
238	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	-
239	12,6	9,4	0,19	5,5	8,0	224	3	57,4	-	-	-	-	-
240	11,6	9,1	0,18	-	7,4	243	8	-	-	-	-	-	-
241	-	-	0,16	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-
243	12,0	8,5	0,18	5,3	8,2	267	5	78,7	0,1	-	0,02	-	0,58
247	11,8	9,1	0,32	-	4,8	250	1	-	-	-	-	-	-
248	11,0	8,5	0,32	5,4	1,8	281	28	42,8	1,0	-	-	-	-
254	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

GPS	Temp °C	pH	Cond mS/cm	OD mg/L	Turbidez NTU	SST mg/L	Potencial redox mV	Caudal L/s	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	B mg/L	As disuelto mg/L	As total mg/L	Fe disuelto mg/L	Fe total mg/L
255	10,0	1,8	17,30	-	-	-	-	60	-	42,0	-	-	-	-
256	-	-	-	-	-	-	-	46	-	-	-	-	-	-
257	-	-	-	-	-	-	-	27	-	-	-	-	-	-
258	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
260	9,0	1,7	10,06	-	-	-	-	20	-	29,0	-	-	-	-
261	10,0	8,7	1,50	-	-	-	-	-	200,9	2,7	-	-	-	-
262	9,9	3,2	2,41	-	15,0	-	516	-	-	8,0	-	-	-	-
263	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
264	12,8	4,6	1,27	-	13,4	-	384	-	-	3,0	-	-	-	-
265	15,5	7,9	2,68	-	3,3	-	287	-	947,9	36,4	-	-	-	-
280	21,4	8,6	1,65	6,4	4,8	0,4	208	342	-	3,4	0,10	0,10	-	0,26
281	23,6	1,5	13,72	5,3	16,2	7,5	511	167	-	30,8	3,44	3,44	-	94,9
282	22,5	2,2	4,85	5,5	15,8	2,2	513	470	-	11,8	1,07	1,07	-	30,5
283	17,3	2,9	2,09	6,4	26,6	9,6	488	-	-	5,6	0,06	0,09	-	8,8
284	18,5	8,3	2,52	6,7	10,5	2,8	139	-	-	27,2	0,51	0,51	-	0,4
287	17,0	2,4	4,19	6,5	11,1	10,7	-	690	-	11,4	-	-	-	-
288	19,0	8,5	0,25	6,3	7,0	3,0	-	93	54,0	0,5	0,03	0,03	0,14	0,64
289	18,6	8,6	0,43	6,7	2,9	11,8	-	198	85,5	0,3	0,02	0,02	0,12	0,18
290	17,3	8,8	0,30	8,1	-	16,5	-	-	-	0,4	-	-	-	-
291	17,8	8,5	0,22	6,7	199,0	-	-	-	-	4,0	-	-	-	-
293	15,3	1,4	18,11	-	23,0	15,9	-	-	-	29,1	4,38	4,42	107	114
296	17,6	5,6	0,87	6,6	4,9	4,7	-	-	-	0,3	0,00	0,00	0,2	0,26
297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-	-
298	22,3	7,1	1,86	7,9	437,3	739,8	-	2291	-	11,8	-	-	-	-
299	21,9	8,0	1,92	-	439,0	-	-	-	-	11,3	-	-	-	-
300	17,8	7,4	1,73	8,5	432,7	666,6	-	2860	-	13,0	-	-	-	-
301	24,0	7,9	1,60	8,6	265,0	378,6	-	2254	-	14,2	-	-	-	-
302	28,2	7,9	3,15	8,4	188,7	276,0	-	1254	-	19,9	-	-	-	-
303	29,8	8,0	3,17	7,5	187,3	-	-	-	-	21,9	-	-	-	-
304	16,4	7,1	1,37	9,6	601,1	-	352	-	-	12,3	0,26	0,26	-	13,4

GPS	Temp °C	pH	Cond mS/cm	OD mg/L	Turbidez NTU	SST mg/L	Potencial redox mV	Caudal L/s	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	B mg/L	As disuelto mg/L	As total mg/L	Fe disuelto mg/L	Fe total mg/L
305	-	-	3,08	-	2,4	-	317	-	-	13,0	-	-	-	-
306	21,4	7,9	2,19	9,1	412,5	316,2	284	-	-	14,8	-	0,23	-	9,84
307	24,2	7,7	2,36	8,6	305,0	200	163	-	-	11,2	0,05	0,24	0,14	10,2
308	28,7	7,8	2,70	8,3	452,6	376,8	233	-	-	11,6	0,07	0,27	0,15	9,6
309	29,7	8,0	3,00	8,3	319,0	-	225	-	-	21,9	-	-	-	-
310	25,7	7,6	13,97	-	3,1	-	252	-	-	30,1	-	0,08	-	<0,03
311	30,2	8,1	3,08	8,1	315,0	242,8	216	-	-	19,9	-	-	-	-
312	30,3	8,1	2,95	8,0	324,2	-	216	-	-	-	-	-	-	-
313	30,4	8,1	3,41	8,2	219,0	261,6	314	-	-	18,9	0,07	0,19	-	8,1
314	-	-	-	-	-	-	-	-	54,0	0,5	-	0,05	-	-
315	-	-	-	-	-	-	-	-	659,0	1,6	-	0,01	-	0,04
323	7,2	8,6	1,79	9,5	29,3	-	118	-	-	-	-	-	-	-
325	12,1	8,5	1,47	9,4	5,2	-	109	-	-	-	-	-	-	-
327	7,1	8,7	1,84	9,0	29,9	19,9	108	-	-	-	-	-	-	-
329	8,8	8,6	1,40	8,6	16,4	-	133	-	-	-	-	-	-	-
331	9,1	8,6	1,75	8,8	80,0	22,6	144	-	143,4	15,5	0,96	0,96	0,18	0,18
333	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
335	12,9	7,7	0,09	17,6	0,5	0,4	129	12	8,2	0,5	0,03	0,03	-	-
337	12,7	8,3	0,19	13,8	4,3	2,4	108	-	22,9	1,0	0,03	0,04	0,16	0,33
339	10,3	8,5	0,73	11,2	6,6	2,4	75	15	98,6	5,4	0,09	0,09	0,15	0,24
341	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
343	53,1	6,3	23,00	-	-	<2	-	1	-	365,3	9,37	9,39	1,06	1,06
345	51,0	6,4	20,20	0,1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
349	20,0	7,2	29,10	13,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
351	35,0	6,2	26,00	0,2	-	<2	-	-	-	406,6	14,57	14,57	2,92	2,92
353	19,1	7,9	29,70	18,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
355	41,0	6,3	22,70	0,5	-	<2	-	-	-	375,6	8,33	8,33	2,11	2,11
357	9,3	7,8	0,59	-	0,6	<2	115	5	57,1	6,5	0,05	0,05	-	-
359	14,5	2,5	4,87	-	24,2	13,5	499	-	-	14,9	0,77	0,79	20,08	23,59
361	14,2	2,5	4,76	-	24,1	10,3	502	-	-	14,1	0,73	0,75	18,94	23,11

GPS	Temp °C	pH	Cond mS/cm	OD mg/L	Turbidez NTU	SST mg/L	Potencial redox mV	Caudal L/s	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	B mg/L	As disuelto mg/L	As total mg/L	Fe disuelto mg/L	Fe total mg/L
363	14,8	8,0	1,00	7,5	6,4	6,8	25	-	-	7,6	0,50	0,50	0,08	0,28
365	11,8	7,8	0,36	6,8	18,0	11,3	70	-	-	3,6	0,13	0,13	0,13	0,17
367	20,3	8,0	5,82	7,7	3,3	2	72	7	-	104,4	7,89	14,73	0,12	0,14
369	22,7	8,3	20,76	18,4	3,4	167,3	-42	0	-	-	-	-	-	-
371	14,8	5,1	2,04	7,0	242,0	11,6	201	15	-	-	-	-	-	-
373	18,9	8,1	2,61	6,8	7,7	13	96	525	142,2	25,3	0,67	0,67	0,05	0,05
375	13,0	7,0	1,19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
377	20,0	8,3	4,68	9,7	21,0	-	-	-	-	32,2	0,06	0,09	0,05	0,82
379	24,8	7,5	14,42	8,6	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
381	21,4	8,2	5,47	10,9	14,0	11,1	-	-	105,5	26,3	0,05	0,08	0,73	0,73
383	22,7	8,1	3,70	8,5	15,4	-	-	-	-	40,6	0,06	0,07	0,58	0,58
385	24,6	7,7	14,09	8,4	0,7	-	-	-	-	57,9	0,15	0,15	0,1	0,1
387	24,1	8,0	7,82	8,8	10,2	-	-	-	-	44,1	0,09	0,10	0,02	0,25
389	24,7	7,9	3,07	8,3	33,5	-	-	-	-	20,8	0,05	0,11	1,33	1,33
391	23,2	7,9	2,49	8,6	46,0	-	-	-	-	16,7	0,23	0,23	0,03	1,46
393	23,8	7,2	2,33	7,8	9,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
395	23,5	7,2	2,26	8,1	55,3	69,1	-	-	-	15,1	0,02	0,17	0,07	1,53
397	22,2	4,8	2,04	7,6	66,2	98,8	-	-	-	13,0	0,01	0,25	0,46	5,32
399	22,2	4,7	2,04	7,6	68,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
401	21,5	4,7	2,02	7,5	136,0	222,4	-	-	-	-	-	-	-	-
403	21,0	4,7	2,02	7,5	59,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
404	-	-	-	-	-	12,6	-	20	-	-	-	-	-	-
405	-	-	-	-	-	<2	-	-	102,6	14,5	0,03	0,05	0,04	0,04
408	50,0	1,8	8,23	0,6	-	<2	-	5	-	-	-	-	-	-
410	32,0	2,2	6,33	3,0	-	8,0	-	30	-	8,5	3,37	3,37	92,92	98,21
412	24,6	2,0	8,00	4,8	-	<2	-	40	-	-	-	-	-	-
414	15,4	1,9	19,33	5,9	-	10,9	-	50	-	-	-	-	-	-
416	13,0	1,9	15,07	6,4	20,0	15,2	-	-	-	30,2	3,58	3,64	119	124
418	11,7	8,8	1,27	6,4	<5	0,3	-	-	82,5	2,8	0,09	0,10	0,34	0,42
420	11,1	2,5	4,53	6,6	10,0	0,6	-	-	-	9,5	0,90	0,92	24,4	37,9

GPS	Temp °C	pH	Cond mS/cm	OD mg/L	Turbidez NTU	SST mg/L	Potencial redox mV	Caudal L/s	Alcalinidad mg/L CaCO ₃	B mg/L	As disuelto mg/L	As total mg/L	Fe disuelto mg/L	Fe total mg/L
428	16,4	8,5	0,13	7,7	1,5	<2	63	7	-	1,9	-	-	0,11	0,43
430	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
432	18,5	9,2	0,34	7,1	2,6	2,3	52	-	-	-	-	-	-	-
434	22,1	9,2	0,36	7,4	1,2	<2	45	-	-	0,5	0,004	0,004	0,08	0,14
438	9,0	8,2	0,32	7,0	-	<2	-	20	41,8	0,4	0,009	0,009	0,07	0,07
440	12,1	2,6	4,18	7,0	-	2,2	-	-	-	6,4	0,550	0,550	13,84	13,98
442	11,1	2,3	4,62	6,7	-	9,4	-	500	-	10,0	0,912	0,919	23,02	23,02
444	16,0	3,6	2,09	6,3	-	16,8	-	-	-	12,6	0,469	0,469	2,46	5,09
448	15,6	2,9	2,14	6,4	-	9,8	-	-	-	0,1	0,009	0,009	-	-
452	15,0	3,7	2,10	6,5	-	11,4	-	-	-	13,1	0,023	0,246	2,87	4,5
454	11,8	8,0	1,04	7,0	-	4,5	-	2	-	2,0	0,027	0,035	0,19	1,02
456	14,5	3,7	2,07	6,6	-	-	-	-	-	12,4	-	0,008	-	0,32
1648	19,7	4,2	1,88	-	23,2	-	395	-	-	13,2	0,196	0,196	-	5,48

GPS	Ca mg/L	Mg mg/L	K mg/L	Na mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	RAS	NO ₃ mg/L	PO ₄ mg/L	F mg/L	I mg/L
9	131,0	24,8	49,2	646,0	1.043,0	7,3	13,6	6,2	0,2	0,4	6,2
10	140,0	62,1	15,9	336,0	491,7	720,0	5,9	2,6	0,1	0,6	2,6
11	128,0	65,7	18,8	1.904,0	301,0	768,0	34,1	5,5	-	0,7	5,5
16	228,0	66,5	28,5	183,0	464,5	987,8	2,7	2,8	-	1,1	2,8
20	13,6	4,6	4,8	16,7	20,2	46,9	1,0	1,2	-	0,2	1,2
24	394,0	94,0	30,0	96,0	737,3	2.251,4	1,1	0,7	-	0,6	1,1
27	60,5	9,3	35,9	285,0	1.769,5	2.243,2	9,0	15,4	-	0,6	15,4
29	20,6	6,0	7,9	17,5	24,1	74,5	<1	1,1	-	0,2	1,1
57	5,8	3,3	1,7	12,7	12,8	39,5	<1	2,6	-	0,2	2,6
71	141,0	64,7	0,6	277,0	300,0	569,0	4,8	2,5	0,1	0,4	2,5
74	370,0	216,0	88,9	414,0	1.364,0	3.164,0	4,2	1,4	0,2	0,9	1,4
75	218,0	36,1	20,4	311,0	440,0	899,8	5,1	1,8	1,6	0,8	1,8
107	205,0	35,9	19,4	254,0	47,3	745,3	4,3	10,4	-	0,6	10,4
134	171,0	46,9	17,0	299,0	444,6	437,7	5,2	2,3	0,4	0,6	2,3
141	386,0	126,0	49,4	648,0	868,7	1.820,0	7,3	3,4	0,6	3,6	3,6
159	108,0	51,0	29,2	196,0	388,9	627,7	3,9	2,7	-	0,8	3,9
160	225,0	53,6	30,6	199,0	442,4	987,4	3,1	2,9	-	0,8	3,1
162	114,0	55,0	31,4	206,0	427,6	654,4	4,0	3,3	-	0,8	4,0
165	28,0	4,9	1,4	16,1	5,4	93,0	<1	0,7	-	0,2	0,7
185	105,0	35,9	19,4	254,0	115,5	252,7	2,1	0,8	-	0,5	2,1
207	22,5	6,0	7,4	18,5	29,5	77,0	<1	0,9	-	0,2	0,9
209	84,0	8,4	32,6	294,0	1.656,4	2.296,7	8,2	15,5	-	0,4	15,5
212	59,0	24,2	1,9	11,6	5,8	196,3	<1	2,1	-	0,3	2,1
216	783,0	21,3	161,0	3.878,0	5.160,9	6.371,6	37,3	57,1	-	0,3	57,1
224	616,0	16,4	79,9	2.600,0	3.175,2	4.651,1	28,2	45,0	-	0,4	45,0
237	28,0	13,5	3,8	7,8	9,3	112,0	<1	0,3	-	0,4	0,4
243	12,4	4,1	4,4	14,5	19,7	45,3	<1	0,8	-	0,1	0,8
280	-	-	-	-	158,5	406,6	-	3,0	-	0,5	3,0
281	-	-	-	-	1.257,8	3.031,5	-	15,8	-	0,5	15,8
282	-	-	-	-	508,1	1.286,0	-	6,0	-	0,4	6,0

GPS	Ca mg/L	Mg mg/L	K mg/L	Na mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	RAS	NO ₃ mg/L	PO ₄ mg/L	F mg/L	I mg/L
283	-	-	-	-	242,2	595,8	-	1,9	-	0,8	1,9
284	-	-	-	-	577,5	233,7	-	5,8	-	0,4	5,8
288	-	-	-	-	36,6	39,5	-	0,0	-	0,1	0,1
289	184,0	13,2	5,3	210,0	379,4	628,1	<1	1,2	-	0,8	1,2
293	1.300,0	148,0	129,0	800,0	1.769,5	3.918,4	3,9	18,1	-	0,2	18,1
296	105,0	20,0	6,1	19,6	7,4	428,1	<1	0,1	-	1,1	1,1
304	0,0	0,0	0,0	0,0	368,6	406,6	-	3,6	-	<0,1	3,6
306	148,0	45,9	32,6	222,0	373,6	485,7	4,1	4,3	-	0,8	4,3
307	149,0	45,9	31,8	222,0	469,4	790,3	4,0	3,8	-	0,8	4,0
308	174,0	53,4	36,8	260,0	584,9	670,9	4,2	3,7	-	1,0	4,2
310	1.300,0	315,0	182,0	1.000,0	3.145,7	4.552,3	6,5	37,1	-	4,0	37,1
313	-	-	-	-	616,4	713,6	-	8,6	-	<0,1	8,6
314	-	-	-	-	10,5	12,8	-	1,5	-	0,2	1,5
315	-	-	-	-	105,5	66,9	-	9,0	-	0,1	9,0
331	113,9	21,7	23,4	230,9	258,0	277,0	5,2	1,2	0,0	-	-
335	2,9	9,2	1,7	1,7	10,3	22,3	0,1	2,8	0,0	0,2	2,8
337	12,6	3,5	3,6	21,1	14,8	34,5	1,4	0,0	0,0	-	-
339	45,3	15,6	9,1	91,7	98,5	106,0	3,0	0,0	0,0	-	-
343	239,5	31,2	279,8	3.463,7	7.720,0	351,0	55,8	0,0	0,0	-	-
351	294,3	40,8	301,1	3.659,3	8.470,0	356,0	52,9	0,0	0,0	-	-
355	272,7	31,2	300,5	3.292,3	7.220,0	343,0	50,3	0,0	0,0	-	-
357	46,8	15,3	6,2	52,8	30,2	132,0	1,7	0,0	0,0	-	-
359	155,7	80,9	43,5	211,0	444,0	967,0	3,4	0,0	1,4	-	-
361	167,2	80,8	41,8	200,3	456,0	1.050,0	3,2	0,0	1,5	-	-
363	103,7	23,8	13,2	102,5	95,9	203,0	2,4	0,9	0,0	-	-
365	26,0	7,0	6,8	40,9	41,6	42,6	1,8	0,0	0,0	-	-
367	157,0	33,2	129,6	938,0	1.710,0	120,0	17,7	0,0	0,0	-	-
373	82,3	22,6	73,7	381,0	596,2	233,0	9,6	8,7	0,0	0,4	9,6
377	408,4	110,5	57,3	527,4	894,0	1.030,0	6,0	0,0	0,0	-	-
381	355,0	109,0	128,0	706,0	1.123,1	1.267,7	8,4	17,7	0,2	1,4	17,7

GPS	Ca mg/L	Mg mg/L	K mg/L	Na mg/L	Cl mg/L	SO ₄ mg/L	RAS	NO ₃ mg/L	PO ₄ mg/L	F mg/L	I mg/L
383	420,0	100,7	48,8	450,1	711,0	793,0	5,1	0,0	0,0	-	-
385	1.210,3	345,2	177,4	1.670,4	3.050,0	3.530,0	10,9	2,5	0,0	-	-
387	521,1	150,4	92,5	889,2	1.540,0	1.820,0	8,8	0,8	0,0	-	-
389	208,6	58,5	41,7	359,5	572,0	640,0	5,7	0,0	0,0	-	-
391	161,6	44,7	35,8	285,9	452,0	524,0	5,1	0,0	0,0	-	-
395	139,1	37,6	33,6	262,0	430,0	501,0	5,1	0,0	0,0	-	-
397	133,0	41,8	54,8	269,0	140,4	840,7	5,2	3,0	0,1	1,0	5,2
401	97,0	6,0	4,8	159,0	319,5	339,2	4,2	6,7	0,0	<0,1	6,7
405	181,0	39,4	25,4	274,0	467,9	506,4	4,8	14,7	0,0	0,9	14,7
410	217,3	85,9	76,5	322,3	455,0	2.930,0	4,7	0,0	1,9	-	-
416	816,0	337,0	421,0	1.205,0	3.743,5	3.264,0	9,0	21,3	1,2	0,2	21,3
418	71,1	37,6	15,5	126,0	159,1	312,0	3,0	3,7	0,0	0,4	3,7
420	251,0	126,0	92,0	371,0	748,7	1.140,1	4,8	3,4	1,6	1,1	4,8
428	10,2	2,9	3,7	8,1	3,4	41,4	0,6	-	-	-	-
434	38,9	9,6	7,3	16,6	26,2	155,0	0,6	-	-	-	-
438	21,6	7,1	4,8	38,1	15,5	97,8	1,8	-	-	-	-
440	90,2	40,2	30,2	148,1	293,0	688,0	3,3	-	-	-	-
442	134,6	63,7	47,1	216,6	467,0	1.100,0	3,8	0,0	1,1	-	-
444	75,5	31,2	186,0	34,4	303,1	479,9	4,5	2,7	0,0	0,8	4,5
448	138,0	68,2	73,0	234,0	280,8	559,8	4,1	1,5	3,2	0,9	4,1
452	89,8	34,2	36,9	226,4	383,0	447,0	5,2	-	-	-	-
454	103,9	19,0	18,4	88,8	103,0	280,0	2,1	-	-	-	-
1648	-	-	-	-	328,5	433,4	-	1,9	-	0,6	1,9

GPS	DQO mg/L	Si mg/L	Cu disuelto mg/L	Cu total mg/L	Mn disuelto mg/L	Mn total mg/L	Zn disuelto mg/L	Zn total mg/L	Pb total mg/L	Sn total mg/L	Cr total mg/L	Cd total mg/L
9	12	149	0,01	0,01	0,05	0,05	0,02	0,02	0	<0,01	<0,01	<0,005
10	12	110	<0,01	0,01	0,02	0,22	0,37	1,4	0,052	-	<0,01	<0,005
11	15	84,9	<0,01	<0,01	0,47	0,47	0,46	0,86	0,081	-	<0,01	0,01
16	-	-	-	0,05	-	2,68	-	3,09	-	<0,01	0,01	0,026
20	-	-	-	<0,01	-	0,07	-	0	-	<0,01	<0,01	<0,002
24	-	-	-	0,02	-	-	0	0,01	-	0,07	<0,01	<0,002
27	-	-	-	0,02	-	0,19	0	0,51	-	0,01	0,01	0,008
29	-	-	-	0,01	-	<0,01	0	0,04	-	<0,01	0,02	<0,002
57	-	-	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,01	0,01	-	<0,01	<0,01	<0,002
71	21	81,5	<0,01	0,02	0,02	0,02	0,23	0,23	0,037	-	<0,01	<0,005
74	<1	195	<0,01	0,03	<0,01	1,41	4,64	10,7	1,486	<0,01	<0,01	0,122
75	12	96,8	<0,01	0,03	<0,01	3,51	0,68	2,1	-	-	<0,01	-
107	-	-	-	0,03	-	0,05	-	<0,01	-	<0,01	<0,01	0,012
134	10	85,5	<0,01	0,01	0,01	0,63	0,03	0,13	0,062	<0,01	<0,01	<0,005
141	-	47,7	<0,01	<0,01	<0,01	0,07	0,03	1,19	-	-	<0,01	-
159	-	-	-	0,01	-	0,1	-	0,29	-	<0,01	0,02	0,003
160	-	-	-	0	-	0,13	-	0,22	-	<0,01	0,01	0,003
165	-	-	-	0,04	-	0,01	-	0,65	-	0,06	<0,01	<0,002
184	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
185	7	-	-	0,06	-	0,13	-	0,7	-	<0,01	<0,01	<0,002
190	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
191	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
192	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
207	5	-	-	<0,01	-	<0,01	-	0,39	-	<0,01	<0,01	<0,002
208	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
209	11	-	-	0,01	-	0,2	-	0,14	-	0,01	0,01	0,011
212	-	-	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,01	<0,01	<0,002
216	40	-	-	0,07	-	0,52	-	<0,01	-	<0,01	<0,01	0,057
224	23	-	-	0,03	-	0,07	-	0,03	-	<0,01	<0,01	0,039
237	-	-	-	<0,01	-	-	-	0,86	-	<0,01	<0,01	<0,002

GPS	DQO mg/L	Cu disuelto mg/L	Cu total mg/L	Mn disuelto mg/L	Mn total mg/L	Zn disuelto mg/L	Zn total mg/L	Sn disuelto mg/L	Sn total mg/L	Cr disuelto mg/L	Cr total mg/L	Cd disuelto mg/L	Cd total mg/L
243	-	-	<0,01	-	0,01	-	0,03	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
280	12	-	<0,01	-	0,05	-	0,01	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
281	<1	-	0,06	-	11,6	-	13,4	-	<0,01	-	0,06	-	0,127
282	<1	-	0,03	-	3,68	-	4,22	-	<0,01	-	0,01	-	0,032
283	13	-	0,02	-	1,63	-	1,65	-	<0,01	-	0,01	-	0,007
284	9	-	<0,01	-	0,37	-	0,03	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
287	<1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
288	9	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,03	<0,01	<0,01	-	<0,01	<0,01	<0,01
289	18	<0,01	0,07	<0,01	0,01	0,24	1,3	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,002	<0,002
290	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
293	<1	<0,01	<0,01	8,61	11,6	15,8	17,8	<0,01	<0,01	<0,01	0,06	0,156	0,177
296	13	0,01	0,03	0,55	0,6	0,07	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,002	<0,002
297	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
298	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
299	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
301	11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
302	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
304	-	-	0,02	-	1,21	-	0,59	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
306	2	-	0,02	-	0,86	-	0,28	-	<0,01	-	<0,01	-	0,004
307	12	0,01	0,05	0,79	1,03	0,04	0,28	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,002	0,004
308	11	0,04	0,06	0,68	0,9	0,03	0,21	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,002	0,004
309	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
310	19	-	0,06	-	0,01	-	0,01	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
311	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
313	7	-	0,01	-	1,03	-	0,19	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
314	-	-	0,03	-	<0,01	-	0,02	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
315	-	-	0,05	-	0,41	-	0,02	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,002
327	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

GPS	DQO mg/L	Si mg/L	Cu disuelto mg/L	Cu total mg/L	Mn disuelto mg/L	Mn total mg/L	Zn disuelto mg/L	Zn total mg/L	Pb disuelto mg/L	Pb total mg/L	Sn disuelto mg/L	Sn total mg/L	Cr disuelto mg/L	Cr total mg/L
331	10	-	<0,03	<0,03	0,092	0,124	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
335	5	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,002	<0,002	-	<0,01	-	<0,01
337	8	-	<0,03	<0,03	0,024	0,024	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
339	11	-	<0,03	<0,03	0,082	0,082	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
343	40	139,1	0,06	0,06	0,332	0,332	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
351	40	126,8	0,06	0,06	0,3	0,308	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
355	36	133,8	0,06	0,06	0,531	0,531	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
357	9	-	<0,03	<0,03	<0,013	<0,013	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
359	<1	-	<0,03	<0,03	3,3	3,3	-	-	-	0,286	<0,28	<0,28	0,137	0,131
361	2	-	<0,03	<0,03	3,107	3,107	-	-	-	0,422	<0,28	<0,28	0,123	0,125
363	-	-	<0,03	<0,03	0,02	0,022	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
365	-	-	<0,03	<0,03	<0,013	0,013	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
367	9	-	<0,03	<0,03	0,521	0,521	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
371	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
373	-	81,9	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,01	<0,01	<0,002	<0,002	-	<0,01	-	<0,01
377	13	-	<0,03	<0,03	0,016	0,194	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	0,075	0,075
381	11	-	<0,01	<0,01	0,2	0,22	<0,01	0,51	0,014	0,015	-	<0,01	-	<0,01
383	-	-	<0,03	<0,03	<0,013	0,221	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	0,062	0,062
385	-	-	0,04	0,05	0,019	0,028	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	0,284	0,284
387	-	-	<0,03	0,03	<0,013	0,222	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	0,146	0,146
389	-	-	<0,03	<0,03	<0,013	0,504	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	0,052	0,054
391	-	-	<0,03	<0,03	0,047	0,54	0,138	0,264	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	0,053
395	10	-	<0,03	<0,03	0,882	0,882	0,344	0,429	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	0,05
397	7	-	<0,01	<0,01	0,84	0,91	0,73	1,07	0,038	0,055	-	<0,01	-	<0,01
401	6	-	-	<0,01	-	<0,01	-	<0,01	-	-	-	<0,01	-	<0,01
405	-	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,33	0,33	<0,002	<0,002	-	<0,01	-	<0,01
410	-	-	<0,03	<0,03	8,861	8,861	4,686	4,813	-	0,074	<0,28	<0,28	0,255	0,255
412	<1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
414	<1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
416	<1	149,3	<0,01	<0,01	11,2	11,4	13,9	13,9	1,958	1,985	-	<0,01	-	0,08

GPS	DQO mg/L	Si mg/L	Cu disuelto mg/L	Cu total mg/L	Mn disuelto mg/L	Mn total mg/L	Zn disuelto mg/L	Zn total mg/L	Pb disuelto mg/L	Pb total mg/L	Sn disuelto mg/L	Sn total mg/L	Cr disuelto mg/L	Cr total mg/L
418	10	-	0,04	0,04	0,02	0,02	0,08	0,08	0,012	0,012	-	<0,01	-	<0,01
420	1	-	0,07	0,08	3,15	3,15	3,77	5,52	0,533	0,549	-	<0,01	-	0,03
428	14	-	<0,03	<0,03	<0,013	<0,013	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
432	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
434	14	-	<0,03	<0,03	<0,013	<0,013	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
438	10	-	<0,03	<0,03	<0,013	<0,013	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
440	<1	-	<0,03	<0,03	2,145	2,145	2,03	2,03	-	0,226	<0,28	<0,28	0,101	0,101
442	1	-	<0,03	<0,03	3,645	3,645	3,201	3,329	-	0,321	<0,28	<0,28	0,16	0,16
444	7	77	<0,01	<0,01	1,13	1,13	1	1,01	0,08	0,082	-	<0,01	-	<0,01
448	3	-	0,04	0,04	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,002	<0,002	-	0,012	-	<0,01
452	6	-	<0,03	<0,03	1,264	1,264	0,971	1,01	-	0,1	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
454	12	-	<0,03	<0,03	0,964	1,034	<0,026	<0,026	-	<0,029	<0,28	<0,28	<0,05	<0,05
1648	-	-	-	<0,01	-	1,26	-	1,15	-	-	-	-	-	<0,01

GPS	Ni total mg/L	Li mg/L	Mo total mg/L	Se total mg/L	Ba total mg/L	Be total mg/L	Co total mg/L	Sr mg/L	Hg total mg/L	V total mg/L	Br total mg/L	CN mg/L	NH ₄ mg/L
9	0	0,68	<0,01	<0,004	0,02	<0,01	<0,01	0,86	<0,001	0,04	<0,01	<0,05	<0,05
10	0,01	0,49	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,01	<0,05	<0,05
11	0,01	0,13	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,01	<0,05	<0,05
71	0	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,01	<0,05	<0,05
74	0,02	0,16	<0,01	<0,004	0,01	<0,01	0,01	0,19	<0,001	0,21	<0,01	<0,05	<0,05
75	0,03	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,01	<0,05	<0,05
134	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,01	<0,05	<0,05
141	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,01	<0,05	<0,05